鏡よ鏡、世界で一番わかっているのはだぁれ？

～第一話：XRT 応答関数 (ARF) の現状を知ろう！～

柴田 亮、本多博彦、平山昌治
宇宙科学研究所

平成 7 年 9 月 30 日

1 はじめに

世界中の多くの人々が、*ASCA* のデータから科学的成果を引き出すのに XSPEC を使用している。XSPEC 上でモデルを推察し、photon index、温度、元素組成比、吸収等の物理量を求めている。そして、これら物理量を求める際には、特に XRT の応答関数の不定性が最も大きく影響していると考えられている。

XRT の Point Spread Function(PSF) と有効面積は、XRT チームを中心として、地上較正実験と軌道上での較正実験により詳しく調べられてきた。これらの calibration 結果を反映した XRT の応答関数は、これまで、jbldarf を通して ARF という形で公開されてきた。また、calibration 情報が充実するにしたがって、ARF にもいくつかのバージョンが存在することになった。さらに、使用する ARF が違うと、得られる物理量が大きく異なっている場合があることもわかってきた。そこで我々は、現在手に入れることのできる ARF にどんな種類のものがあり、それぞれどのような特徴を持っているのかを知る必要がある。そしてその ARF の特徴が解析結果にどのような影響を及ぼすかをよく理解しておかなければならない。

本レポートでは、これら ARF の特質の理解を深め、XRT の PSF や有効面積の問題点を洗い出すことを目的としている。それらの問題点を指摘することによって、本レポートが今後の XRT の応答関数の改善に役立つことを期待している。その結果として、XRT と GIS 及び SIS の cross calibration を通し、GIS 及び SIS の検出効率を精度良く決定するための道を拓くことになるだろう。

2 XRT の応答関数

XRT の応答関数を再現するシミュレーターとして ray-tracing プログラムがある。ray-tracing プログラムは、名古屋大学を中心に長年に渡って開発され、現在なお改良を進めている。また、現在、*ASCA* の ARF 作成に必要な XRT の応答関数に関する情報は、すべてこの ray-tracing プログラムに基づいている。またこれとは別に、fast Monte Carlo simulator として Fast XRT がイメージグループによって開

発された。Fast XRT では、実データのイメージを PSF として用いているため PSF が極めて忠実に再現される。しかしこれらの方法では一般に、応答関数を充分な精度で再現するためにはより多くの計算時間を要する。

さらに、ray-tracing プログラムによって作成された有効面積や PSF をいくつかの典型的な条件の下であらかじめデータテーブルとして作っておき、ARF 作成時にはそのデータテーブルを参照・補間するという方法もある。また、PSF に関しては、地上実験をもとに経験的な算術関数で表現する試みも行なわれた。データテーブルや算術関数を用いる方法では、応答関数の再現精度を犠牲にしている代わりに、計算にかかる時間を大幅に短縮している。そのため、一般的な解析に用いられる jbldarf などではこのような方式を用いている。

2.1 ARF の種類

我々は、XRT simulator を用いて ARF を作成するための SimASCA module "SimARF" を開発した。本レポートでは、これを用いて、XRT simulator として ray-tracing プログラムを用いた場合 (以下では SimARF「ray-tracing」と呼ぶ) と、Fast XRT を用いた場合 (以下では SimARF「FastXRT」と呼ぶ) のそれぞれについて、XRT の応答関数がどこまで正しく再現されているかを調べた。また、比較の対象として、従来から用いられてきた jbldarf による ARF も調べた。jbldarf の PSF-Type としては、PSF の表現に算術関数を利用する analytic オプションを用いる場合 (以下では jbldarf「analytic」と呼ぶ) と、データテーブルを参照する table オプションを用いる場合 (以下では jbldarf「table」と呼ぶ) の 2 種類について比較を行なった。これら 4 つの方法によって作成される ARF はそれぞれ異なった有効面積を示す。その結果、それぞれの ARF を使って実データの fitting を行なうと異なった結果が生じる。

今後文章中では、"ARF" とはこれら 4 つの方法によって作成されたものを指し、"XRT の応答関数" とは 4 種類の ARF の作成方法の違いを表す意味で使用する。

2.2 SimASCA と SimARF

まず SimASCA について説明する。SimASCA は入射してきた photon が検出器に検出された時にどのようなイメージを描き、どのようなスペクトル構造を示すかを、シミュレーションで再現するためのソフトウェアーである。具体的には、まず任意のスペクトルモデル及び空間分布に従う photon を発生させる。各 photon は、XRT simulator、GIS/SIS simulator、座標変換 module、データ型変換 module などを通過して、イメージやスペクトルを作る解析 module 群へと渡される。それぞれの機能を果たす module は独立性が十分高く設計されており、また機能分担の方法は SimASCA の仕様として決定されている。このように SimASCA は *ASCA* のフルシミュレーションを行なうための枠組であり、個々の module を入れ換えたり自ら作成することによって、さまざまな状況を再現できる柔軟性のあるソフトウェアーである[1]。

---

[1] 例えば、ray-tracing を用いて迷光の評価も行なうことができる。

SimARF は SimASCA 上で走る ARF 作成 module である。SimARF は、(E,θ,ϕ)[2] の情報を与えた photon を発生し、各 photon は “XRT simulator”、“GIS/SIS simulator” をフィルターとして通過する。これらのフィルターでは、XRT の反射率及び検出器の検出効率を考慮して、photon の取捨を決定する。そして最終的にフィルターを通過してきた photon をカウンターで受けて計数し、エネルギー毎に photon の “通過率” を計算する。SimARF はこうして求めた “通過率” に、幾何学的面積[3]を掛けたものを、ARF として出力する。図 1に概念図を示す。

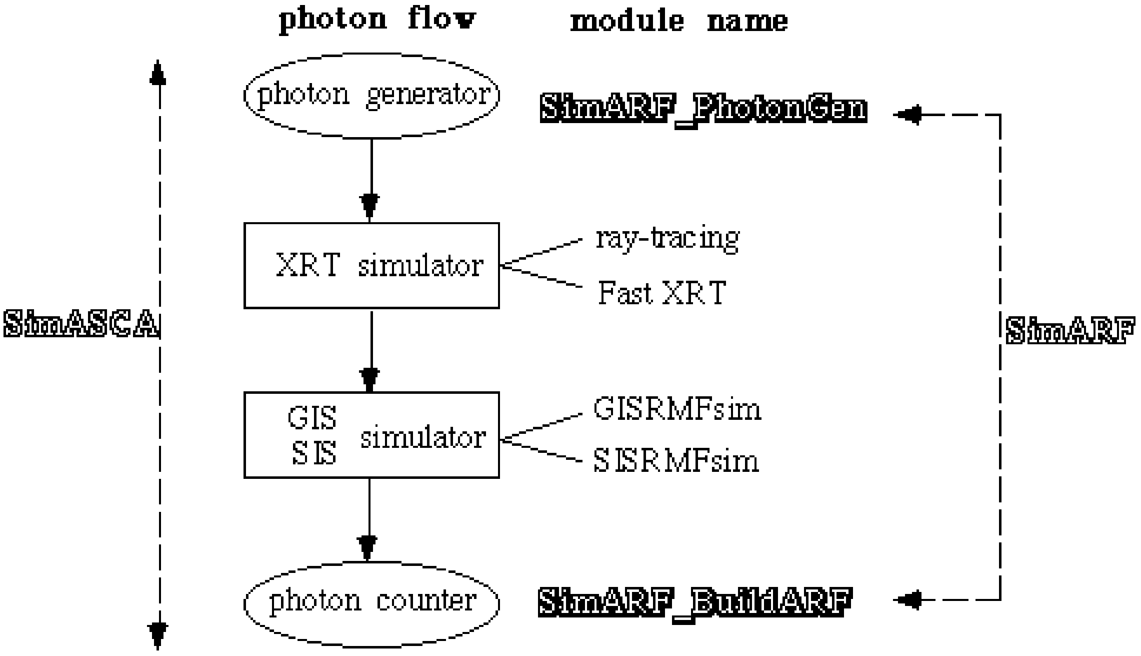

図 1: SimASCA ·SimARF の概念図

2.3 参照する PSF と有効面積

ARF を作成する際に必要となる PSF と有効面積の使われ方を、XRT の応答関数毎に述べる。また表 1にそれらをまとめる。

◇ jbldarf 「analytic」[4]

PSF は算術関数[5]を用いて表現している。この PSF は特にその裾部分が正確に再現されていない。有効面積は ray-tracing によるシミュレーション結果をテーブルにしたものを参照する形になっている。

---

[2] 入射 photon のエネルギー: E 、XRT の光軸からの離角: θ、検出器座標系で+X 軸方向を 0゜とし、時計回りを正とする。: ϕ

[3] デフォルトは 826.6cm^2

[4] 1995 年 4 月に jbldarf_2.00 がリリースされるまでは全てのユーザーはこれを使用していたことになる。

[5] 粟木関数と呼ばれている。

◇ jbldarf 「table」

PSF も有効面積も ray-tracing によるシミュレーション結果のテーブルを参照している。テーブルに無い値は補間している。

◇ SimARF 「ray-tracing」

PSF と有効面積を区別せずにひとまとめに考える。前の 2 つの ARF と違って、ray-tracing によるシミュレーション結果を直接反映している。

◇ SimARF 「FastXRT」

PSF は Cyg X-1 の実データーのイメージそのものを用いる。有効面積は jbldarf と同様の ray-tracing によるシミュレーション結果のテーブルが使用される。そのテーブルに対して、Crab の実データを 「power law + 吸収」で fitting したときに残差が一定になるように補正を加える。

表 1: 各計算方法で参照する有効面積と PSF

ARF builder	計算方法	有効面積	PSF
jbldarf	analytic	有効面積テーブル [a]	粟木関数
	table [b]	有効面積テーブル [a]	PSF テーブル [c]
SimARF	ray-tracing	モンテカルロシミュレーション	
	FastXRT	有効面積テーブル [a] [d]	Cyg X-1 のイメージ

a: xrt_ea_V1.1.fits

b: jbldarf のオプション名であって、「表」という意味ではない。

c: xrt_psf_V1.1.fits

d: 厳密にはこれに Crab のデータで補正したもの。

2.4 SimARF で作った ARF の妥当性

SimARF で作成した ARF の妥当性を示すため、SimASCA を使って作成されたスペクトルに対して、各々の ARF を用いた場合の fitting 結果を比較した。センサーは GIS2 のみとした。

♣ 条件

スペクトル : SimASCA による ray-tracing シミュレーションより作成
RMF : gis2v4_0.rmf
ARF : jbldarf 「analytic」、jbldarf 「table」、SimARF 「ray-tracing」

◇ 方法

作成したスペクトルは kT= 8 keV の bremsstrahlung モデルに従うもので、これをソースを中心にリング状に 0.0~2.5 分角、 2.5~5.0 分角、 5.0~7.5 分角、 7.5~10.0 分角、 10.0~15.0 分角、 15.0~20.0 分角、 20.0~30.0 分角の輪切りに

した領域を取った。ARFもこの積分領域に合わせて作成し、それぞれのデータをthermal bremsstrahlungモデルでfittingした。求まった温度を各積分半径に対してプロットしたのが図2、図3である。

◇ 結果・考察

jbldarf「analytic」で作成したARFでのfitting結果は、ソース中心から離れるに従って温度は発散してしまい、全くPSFが合っていないことが良くわかる[6][図2]。それに対してjbldarf「table」は「analytic」に比べてPSFが飛躍的に改善されていることがわかる。そしてSimARF「ray-tracing」で作成したARFは、外側の領域までよく再現されている[図3]。

図3の結果をもとに考察する。まず初めにSimARF「ray-tracing」で作成したARFが、全領域でよく再現されているのは当然である。その理由は、スペクトルを作成する際にSimASCA内で用いたray-tracingと、SimARF「ray-tracing」でARFを作成する際に用いたそれが全く同じだからである。

次に、jbldarf「table」で作成されたARFでのfitting結果と比較すると、以下のようなことが言える。第一に、両者の温度差は有効面積の違いによるものである可能性が大である。実際jbldarf「table」で参照する有効面積テーブルは、異なるバージョンのray-tracingによる結果から作成されている。従って、有効面積テーブルを最新のray-tracingを使って作成しなおす等の必要がある。第二に、jbldarf「table」での温度が領域毎に異なるのは、PSFがまだ十分に再現できていないからであろう。標準的な解析[7]を行なうのにはおそらく問題にはならないだろうが、銀河団内の温度構造を求めるような特殊な解析をする時には十分問題となり得る。

3 実データのfitting結果

次に実データを用いて前節と同様に輪切り解析を行なった。使用した実データはMkn421、Crab、Cyg X-1で、スペクトル・ARFともに前節と同じ輪切り領域を取った。またどの実データもセンサーはGIS2のみ、COR[8]は8 GeV/c以上、ELV[9]は5度以上、という条件で解析を行なった。

♣ 条件

データ : Mkn421 (ft950425_1916.0301)、Crab (ft940928_0415.1811)
Cyg X-1 (ft931111_0136.0440)
BGD : 公開されているblank skyのデータ
RMF : gis2v4_0.rmf
ARF : jbldarf「analytic」、jbldarf「table」
SimARF「ray-tracing」、SimARF「FastXRT」

---

[6] PSFが正しければ、すべての輪切り領域についてパラメータは一定になるはずであるから。

[7] 例えば、ノミナル位置で観測された点源の、半径6分角内のスペクトルを解析するような場合など。

[8] Cut Off Rigidity

[9] elevation angle from Earth

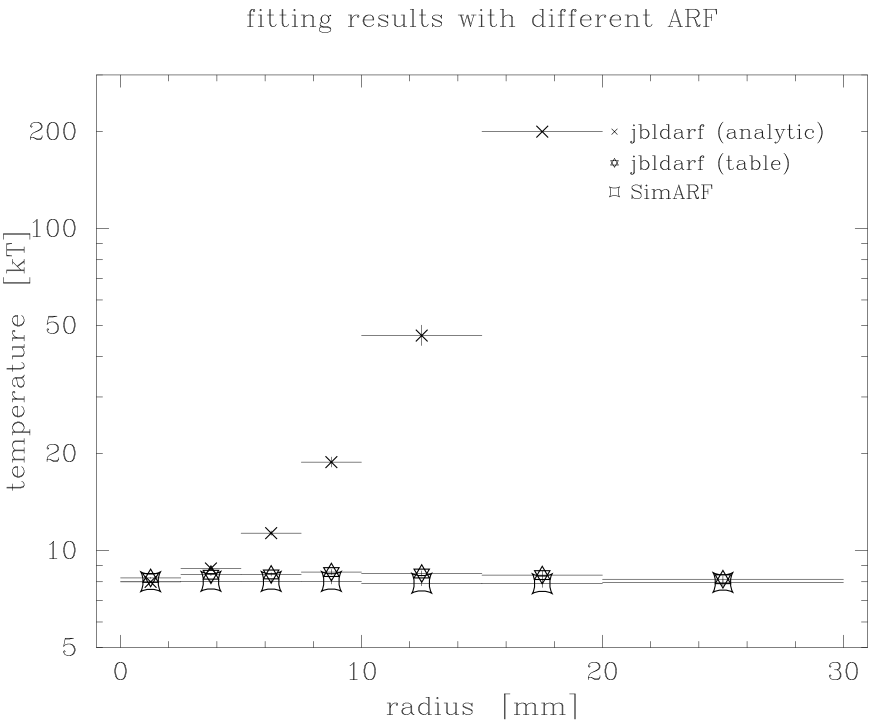

図 2: fitting model の温度とソース中心からの半径の関係 (1)

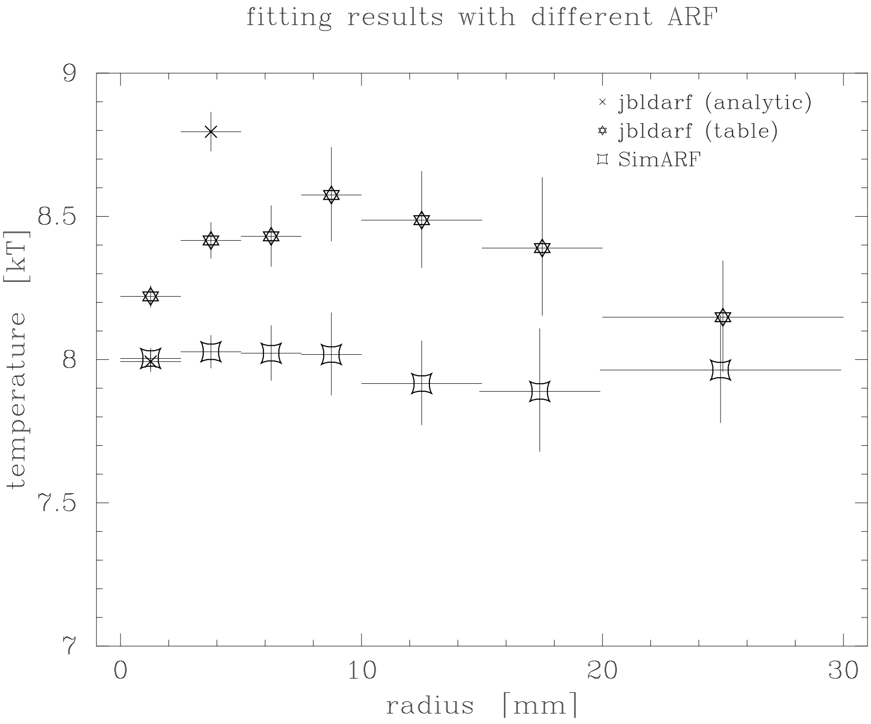

図 3: 図 2の拡大図

3.1 Mkn421

Mkn421を用いた解析では以下のような利点がある。

- スペクトルのモデルが単純である。

  XRTの応答関数がどれだけ正しく再現されているかを調べたいので、複雑なモデルでないと説明できないものや、モデルがわかっていないものでは困る。

- 統計が十分なデーターである。

  ARFの問題点を洗いだすためにfitting結果の残差が重要になってくる。従って、データの統計誤差はできるだけ小さい方が望ましい。

- 高エネルギーphotonが少ない。

  XRTの有効面積は5keV以上のところで問題があることが分かっているので[10]、hard成分側にphotonの多いスペクトルを持つソースは望ましくない。

図4に結果を示す。バックグラウンドを引いてあり、バックグラウンドの占める割合は図中に示してある。データの誤差は90%errorである。Mkn421のモデルは、『吸収 + power law」で説明できる。

この解析では、点源からのX線を異なる半径で積分して見ていることになるため、XRTのPSFが十分正確に表現されていれば、すべての輪切り領域で同じphoton indexが得られるはずである。図4のSimARF 『Fast XRT」によるphoton indexの値は、まさに積分半径によらず一定となっている。このことは、『Fast XRT」がXRT PSFを忠実に再現していることを示している[11]。一方、同図のray-tracingの結果をこれと比較して見ると、photon indexがsystematicに下がっている。このことは、ray-tracingの高エネルギー側でのefficiencyが実際より低く見積もられていることを示している[12]。つまり、実際のXRTは、ray-tracingが予想するよりも多くの高エネルギーphotonをPSFの外側まで蹴り出していると言える。

3.2 Crab

Crabを用いた解析では以下のような利点がある。

- スペクトルのモデルが単純である。

- 統計が十分なデーターである。

- SimARF 『FastXRT」で参照する有効面積の補正の効果を確認できる。

  補正がきちんと行なわれているのか、またどのくらいの精度で補正がかかっているのかを確認できる。そして、これを基準に他の方法で作成したARFの評価ができる。

---

[10] Crabのfitting結果からその残差が明らかになった。

[11] 『Fast XRT」ではXRT PSFとして実データを用いていることを考えると、これは当然の結果である。

[12] もちろんこのことは、低エネルギー側でのefficiencyが高く見積もられている、と考えても説明できる。いずれにしても、efficiencyの傾きが正確に表現されていないことは間違いない。

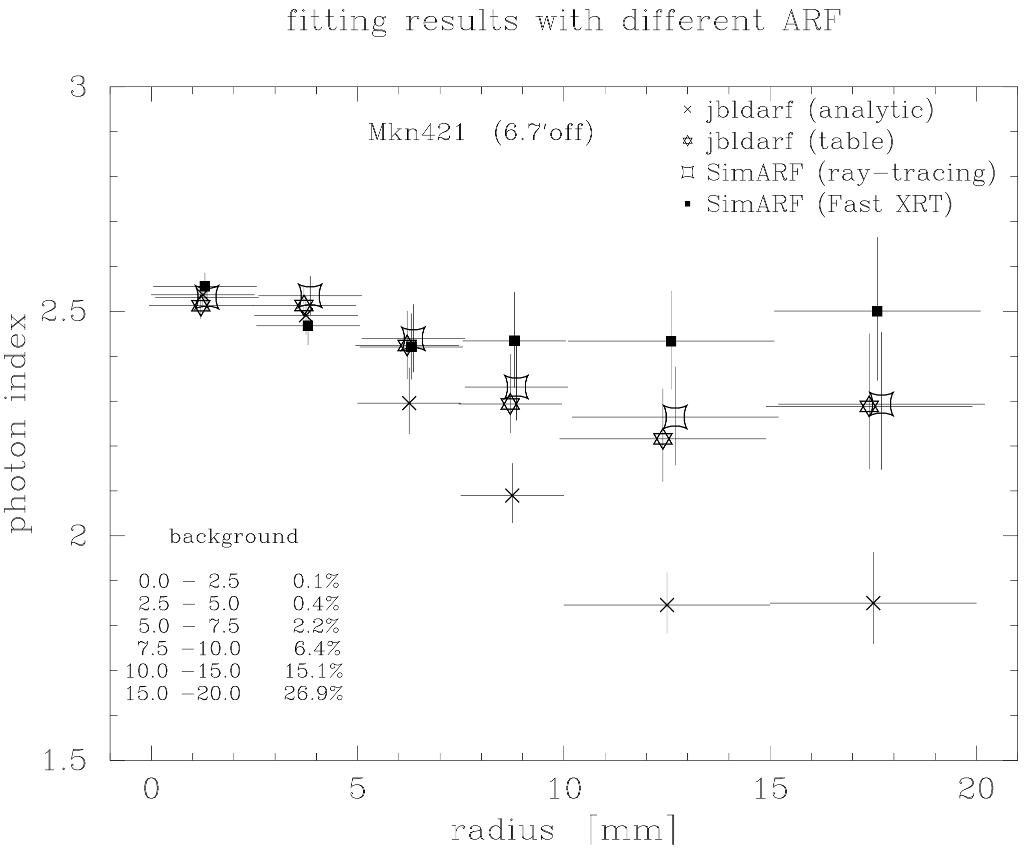

図 4: fitting model の photon index とソース中心からの半径の関係

Crab のスペクトルを jbldarf_0.50 で作成した ARF[13]で fitting すると、5keV 付近に輝線状の構造が残り、残差として最大 5%の系統的なうなりがあることが知られている。この残差のため、acceptable な reduced χ^2が得られず前節と同様の輪切り解析はできなかった。そこで Crab に関しては、ソースを中心に半径 6 分角の積分領域を取り、SimARF「ray-tracing」[14]で作成した ARF を用いて fitting を行なった。fitting は best fit の場合 (以下、図中では parameter value <free>と表示) と、photon index α と星間吸収 N_{H}を以下の値で固定した場合 (以下、図中では parameter value <fix>と表示) についてそれぞれ行なった。

$$
\begin{aligned}
\alpha &= 2.10 \\
N_{\mathrm{H}} &= 0.30 \times 10^{22}\ \mathrm{cm}^{-2}
\end{aligned}
$$

図 5に SimARF「ray-tracing」で作成した ARF を用いて fitting した結果を示す。バックグラウンドは引いてある。バックグラウンドの占める割合は 0.1% 以下であった。スペクトルモデルは、「吸収 + power law」である。やはり、報告されているような系統的なうねりが 5keV 付近に見られる。ちなみに、ray-tracing の結果を 1%以

---

[13] 本レポートの jbldarf「analytic」で作成した ARF に相当する。詳しくは石田さんのレポートを参照のこと。

[14] ray-tracing のバージョンは **2.0** である。

下の精度で直接Crabの実データと定量的に比較したのは、これが初めての試みである。

図6は同じデータをSimARF 『FastXRT」で作成したARFを用いてfittingした結果である。図5と同様にバックグラウンドは差し引いてある。『FastXRT」では、Crabのスペクトルがpower lawで合うように有効面積に補正をしているにもかかわらず、5 keVの構造は残ってしまった。そこでこの原因を調べるために補正テーブルを見てみると、『FastXRT」で行なわれている補正は十分に精度よく行なわれているとは言えないことが分かった。従って我々は残差の原因は補正の不十分さにあると結論した。

以上のような精密な比較 (精度 $\sim 1\%$) が出来たのは、新たに開発したSimARFによるARF作成という手法を採ったからであることも申し添えておきたい。

3.3 Cyg X-1

Cyg X-1を用いた解析では以下のような利点がある。

- 統計が十分なデーターである。
- SimARF 『FastXRT」で参照するPSFが、信頼できるものかを確認できる。

  Cyg X-1の実データのイメージをもとにPSFテーブルを作成したので、PSFに問題が生じることはない[15]。その確認と、どれくらいの精度でPSFが再現されているか調べることができる。

しかし、**§3.1**と同様の解析をする際にCyg X-1で問題となるのが、モデルがはっきり知られていない点である。結果的にはモデルが複雑になってしまい、Crabと同様にacceptableなreduced χ^2が得られず、特定のパラメータに注目してその輪切り半径依存性を議論することは不可能であった[16]。

4 まとめと考察

本レポートで行なった解析を通して分かったことを述べ、考察する。

- SimARFの有用性

  SimARFはXRTの応答関数の再現性を調べるのに直接的で、且つ、有効な方法であることが分かった。出力される結果の妥当性は**§2.4**で確認され、また実データとの比較精度においても $\sim 1\%$ というこれまでにない高精度を実現している。本レポートで示した手法は、今後ray-tracingやFast XRTを改善していく際に大きく貢献できる。

---

[15] SimARF 『FastXRT」のPSFテーブルを作成する際に用いた実データの一つであるから

[16] 他のパラメータに大きく依存してしまうから

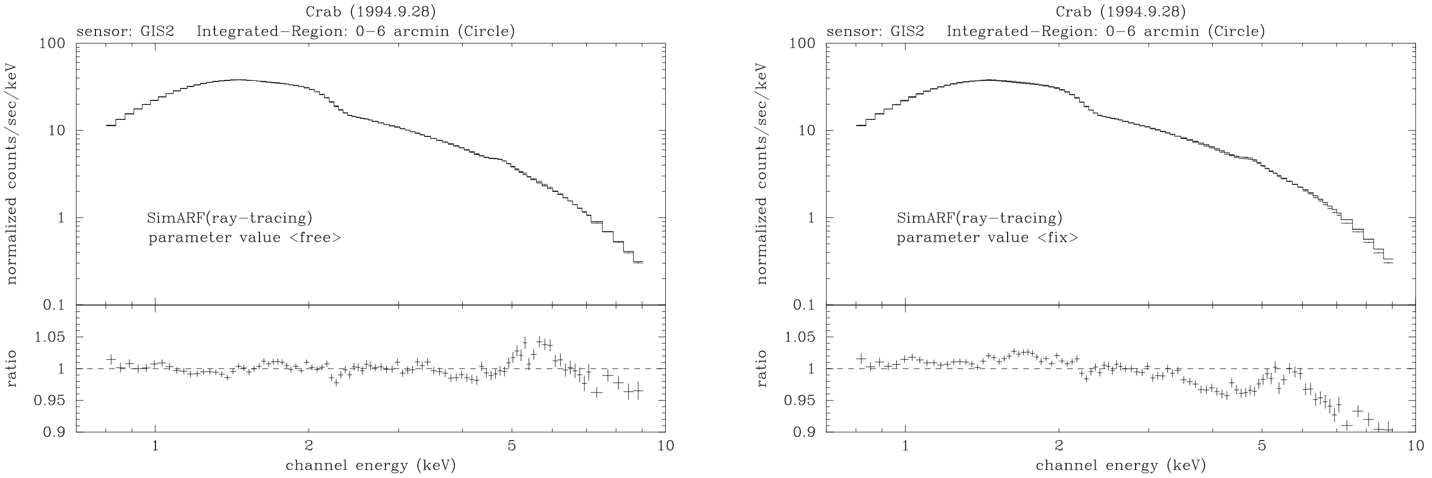

図 5: Crab の fit 結果 (ARF: SimARF 「ray-tracing」)

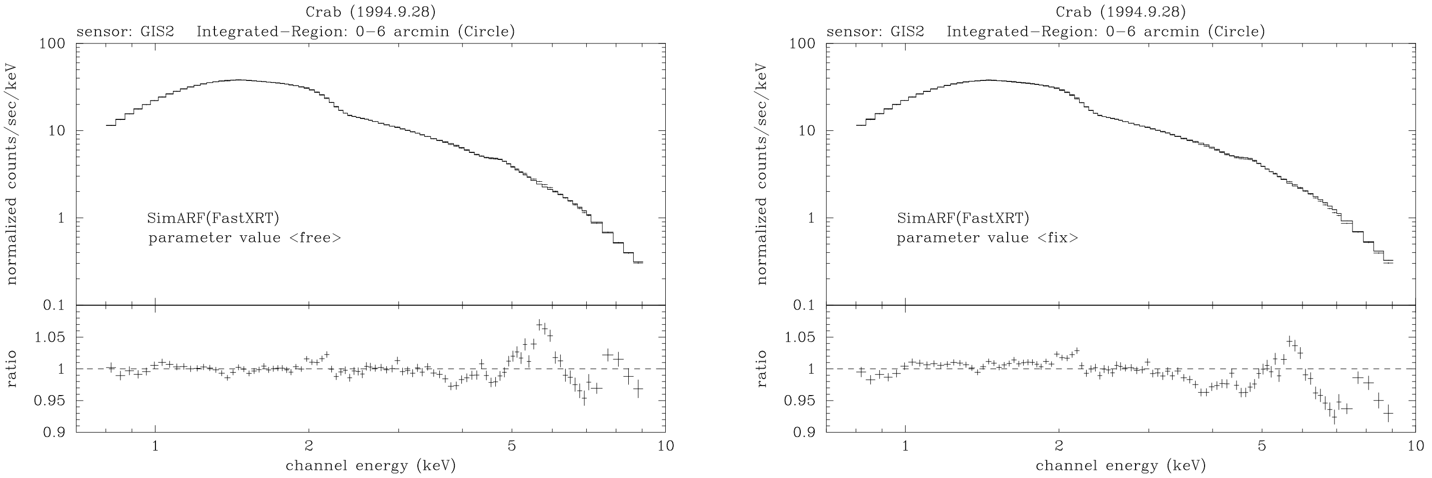

図 6: Crab の fit 結果 (ARF: SimARF 「FastXRT」)

- 高エネルギー領域の有効面積

  Crab の fitting 結果 [図 5、図 6] では、どちらも有効面積が高エネルギー側で合っておらず残差が見られる。一方 Mkn421 は明るいポイントソースではあるが、Crab ほど十分な統計がなく、また photon index $\simeq 2.5$ という比較的軟らかいスペクトルなので、高エネルギー側における残差の構造が顕著に現れなかった。一般によほど明るくない限り、この構造が認識できることはないと考えられる。しかし、以下に述べるような理由で、たとえ暗いソースであっても有効面積の問題そのものを回避できるわけではない。

  Crab で見られた残差は ray-tracing プログラムがまだ完全に *ASCA* を再現するに至っておらず、光学定数を含め、改良の余地があることを意味している。そして目標として、Crab の fitting 結果が正しく再現されるまで改良する必要がある[17]。この改良においては、高エネルギー側 (4–10keV) での有効面積の傾きを変える必要がある (図 5右図参照)。この場合、広いエネルギー範囲で XRT の efficiency curve が変わるため、phton index、絶対フラックス、鉄輝線の強度などに影響を及ぼすと考えられる。

  特に、power law モデルの photon index や高温の thermal bremsstrahlung モデルの温度のように、あすかのエネルギーバンド全体に渡るスペクトルの「傾き」を反映したパラメータは、ソースの明るさに依らずに一定量の変更[18]を被ることになる。さらに、高エネルギー側に photon の多いスペクトルの場合には、total flux の見積りに大きな変化が現れる可能性がある。したがって、有効面積の改訂があった場合、「硬い」スペクトルを持ったソースについては、たとえ暗いソースであっても fitting 結果が影響される。

- 「ray-tracing」による PSF の再現性

  「FastXRT」は XRT PSF(+ GIS PSF) を極めて忠実に再現する。図 4ではその再現性を確認することができた。ray-tracing の作り出す PSF は、これまで XRT チームによって、単色 X 線に対するその形状を実データと比較する作業が極めて高い精度で進められてきた。にもかかわらず図 4では、その再現性にまだ問題が残っていることがわかった。そこで、ここでは XRT PSF の再現性を調べる方法について考察する。

  そもそも XRT PSF は、photon のエネルギー Eと PSF 中心からの距離 rの関数 $f_{PSF}(E, r)$ として捉えることができる[19]。これを実データと定量的に比較する場合、理想的には、同じ (E, r) 空間に実データを分布させ (2 次元ヒストグラム)、その photon 分布と $f_{PSF}(E, r)$ の比較をすればよい[20]。しかし実際に

---

[17] 何事も Crab を基準にしている。「Crab をどれだけ正確に再現しているか」ということが他のソースの fitting 結果の信頼性となる。

[18] Crab の photon index は 2.10 (キャルの目標値) に対し、本レポートでの best fit は 2.16 (「SimARF」ray-tracing の場合) となっている。このことから、ray-tracing (version 2.0) で作成された有効面積テーブルを使って求めた photon index には$\Delta\alpha \sim 0.06$ 程度の不定性があることになる。

[19] 簡単のため、off-axis angle を固定して考え、PSF 形状の方位角度依存性は無視する。

[20] 例えば、normalization を free paramter として導入して、$f_{PSF}(E, r)$ をモデルとした 2 次元 fitting を行なうなどといった方法が考えられる

は、データの統計不足などの問題を回避するため、エネルギーEまたは半径rのどちらか1軸のある範囲内のphotonを選びだしてもう一方の軸上へ射影したもの(1次元ヒストグラム)を比較する方法が一般的である。例えば、特定の半径rの範囲を指定してエネルギーE軸上への射影をつくるやり方は、§**3.1**で示した方法に対応し、反対に、エネルギーEのある範囲を指定して半径r軸上への射影を作るやり方は、XRTチームがこれまで行なってきた方法であると言える。

ここで重要なことは、いろいろな半径による輪切り解析の結果をひとつの図(図4)にプロットしてみて初めてray-tracingによるPSFの再現性に問題があることに気付く、ということである。例えば、図4で半径7.5 ∼ 10.0分角のphoton indexを比較した場合、Fast XRTとray-tracingでは統計的に一致しているように見える。しかし、図4全体を眺めてみると、半径7.5 ∼ 10.0分角において既に両者の結果に違いが出始めていることがわかる。このようなことがわかるのは、photon indexを特定の半径に限って比較するのではなく、そのずれ具合を全体にわたって眺めてみたからである。換言すれば、ray-tracingによるPSFの再現は、既に、各半径毎に比較したのではわからない程に微妙な違いを議論しなければならないところまでtune upされてきているのである。

この考え方をさらに発展させると、単色X線に対するPSF比較という方法では、もはやPSFの再現性をチェックできる限界にきていることがわかる。実際、エネルギーEと半径rを入れ換えて前段落の解釈を適用すれば、「単独エネルギー帯でのPSFの比較では統計的に有意な違いを見い出せないが、全エネルギー帯に渡って比較した場合には、両者の間に全体の傾向としての差を見い出すことができる」可能性が高いことを意味する。この場合、複数のエネルギー帯でのPSF比較を行なうことが必要なだけではなく、そうして得られる違いを定量化[21]し、広いエネルギー範囲にわたってその傾向を調べることが必要不可欠なのである。

- 「FastXRT」における有効面積補正の問題

「FastXRT」によって作られたARFを用いたCrabのfitting[図(6)]では、有効面積の補正テーブルのビンが粗すぎることがわかった。従って今後の改良として、有効面積の補正テーブルをさらに細かくするといった改善が望まれる。

5 今後の課題

今回の解析結果でXRTの応答関数の改善すべき点がいくつか明らかになった。本レポートを出発点として今後on-board calibrationを利用してray-tracingの改良を行ない、turn upしていく必要がある。具体的にはまずCrabの実データを利用して高エネルギー側の有効面積を改善すべきであろう。さらにその上でPSFの裾の再現性を高め、離角に対するXRTの応答の正確性を追求したい。そして、改良の結

---

[21] 例えば、PSFの1次元profileと実データのradial profileとのχ^2 differenceをとるなど

果をすばやく一般ユーザの解析に反映させるためには、turn up と同時に有効面積テーブルの更新も行なわなくてはならない[22]。

また、今回はポイントソースのみを取り扱ったが、将来的には広がったソースの解析における PSF や有効面積の及ぼす影響を評価していきたい。

6　謝辞

今回の解析を行なうにあたって、多くの方に御協力を頂きました。Mkn421 に関しては PI でおられる高橋さん、データ提供者の片岡さん、Crab Calibration 観測に関しては石田さんおよび石崎さん、そして Cyg X-1 に関してはイメージグループの皆様、御協力ありがとうございました。また SimASCA/ASCA_ANL W.G. の方々や各 module 製作担当者の方々には、解析方針・方法等について多くの御指導を頂きありがとうございました。

7　次号予告

- SimARF、ついに待望のリリース！
- 有効面積の謎に迫る
  — 失われた efficiency を求めて —

---

[22] 1994 年 4 月以降、有効面積テーブルの更新は一度も行なわれていない