

「ぎんが」 LAC に関する Crab Cal レポート

上田佳宏

1993 年 4 月 22 日

目次

1	はじめに	2
1.1	目的	2
1.2	LAC のレスポンス関数について	2
1.3	使用したデータ	2
2	フィッティング結果と考察	4
2.1	バックグラウンドの引き方による影響	4
2.2	2-37keV でのレスポンス	4
2.3	7-37keV でのレスポンス	7
2.4	Power Law のパラメーター値について	8
2.5	標準レスポンス関数 (RESSETD) に対するまとめ	11
3	コリメーター反射補正の問題	12
3.1	反射補正とは	12
3.2	反射補正の種類と問題点	12
3.3	反射補正の改良	14
3.4	姿勢が時間変化している場合について	20
3.5	反射補正のまとめ	21

1 はじめに

1.1 目的

「ぎんが」 LAC による Crab Nebula の観測は、1987 年 3 月、1990 年 3 月、1991 年 9 月の 3 回行なわれた。LAC のレスポンスは、Crab のエネルギースペクトルが Power Law で合うように作られているはずである。そこで、Power Law で Fitting を行い、その結果から現在使われているレスポンス関数がどこまで信頼できるか確認するとともに、3 つの時期での結果を比較し、レスポンスの経年変化がないかどうか調べる。

ただし、Crab Cal には、「Crab Nebula のスペクトルは LAC のエネルギー分解能で見ると限り完全な Power Law で、5 年程度では決して変化しない」という大前提がある。

1.2 LAC のレスポンス関数について

LAC のレスポンス関数には、HV-Normal 用と HV-Low 用の 2 種類があるが、このレポートでは HV-Normal について扱う。いずれのレスポンス関数も Top Layer 用と Mid Layer 用に 2 つ作られている。しかし、実は、どちらか一方のレイヤーだけでは正しいレスポンスが再現されていず、両者を加えたときにはじめて（癖が打ち消し合って）正しいレスポンスが得られるようになっている（図 1 に例を示す）。また、これらのレスポンス関数は、各センサー別に作られていない。つまり、平均のレスポンスが Top Layer 用と Mid Layer 用に 1 つずつあるだけであり、8 本のカウンタの Top Layer と Mid Layer 全てを加算したときにつじつまが合うようになっているのである。コリメーターの反射補正についても同じで、8 本についての平均が使われている。しかし、実際はそれぞれのカウンタには個性があるため（例えば入射窓ベリリウムの膜厚）、各センサー別にフィッティングを行なうのはあまり意味がないことになる。さらに、よくやられていることだが、一部のカウンタ（たとえばガスの抜けている LAC6 ,7）を除いて解析するのも厳密にいうと正しいとは言えない。

1.3 使用したデータ

Date	Exposure (sec) [¶]	Transmission	使用した Background
1987/03/27	188	0.94-0.97	1987/03/30
1990/03/22	128	0.96-0.97	1990/03/22(On Source と軌道を合わせた)
1991/09/19	472	0.90-0.93	1991/09/19(On Source と軌道を合わせた)

¶: バックグラウンドを SUD ソートで引いた場合の Real Time (SUD 条件が合わないデータは使用されない)

いずれも MPC-1 Mode, BIT-H のデータのみを使用した。（Spill Correction はしなくてよい。）また、コリメーターの反射補正の不確実性をなるべく除くため、Crab の Transmission が 90% 以上のデータのみを使用した。また、90 年で使用したデータは衛星の姿勢変動を無視することができるが、87 年と 91 年で使用したデータは、観測中に衛星の姿勢変化にともなって Transmission が 3% 程度変化している。ところが、コリメーターの反射補正には観測時間中の平均的な姿勢だけが用いられるので、姿勢が変化している時のデータを使用するときは注意しなければならない。観測中の姿勢変動の影響については 3.4 を参照のこと。

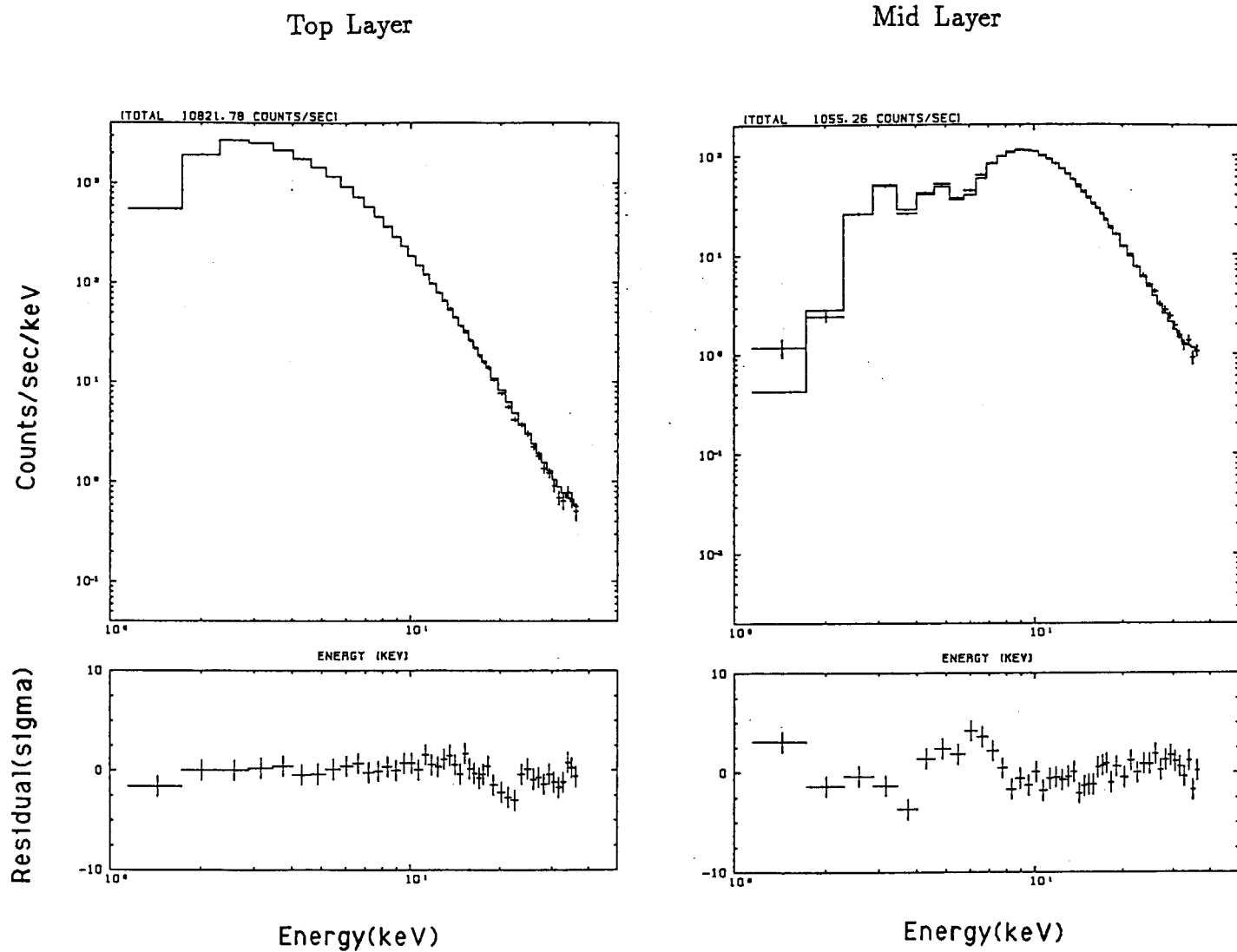


図 1: Crab Nebula(1990) のレイヤー別フィット (POWL*ABSM,NH は固定)
 左:Top Layer、右:Mid Layer。Mid Layer はそもそも合っていない。また Best Fit Parameter も Top, Mid で有意に異なる値をしめす。

2 フィッティング結果と考察

ここで使用したレスポンス関数は、もっとも標準に使われている

PSB237.CSUB1.FORT77(RESSETD)

である。Fitting はいずれも systematic error を 1% 加えている。エネルギースケールは、それぞれの年度について、バックグラウンドの銀ラインのチャンネルから計算して各カウンターレイヤーごとに正確に決定している。（各カウンターごとに、トップレイヤーとミッドレイヤーの誤差重みつき平均を用いた。）また、ガスの抜けている LAC6 と LAC7 を除いて Fitting した結果も併せて示す。

2.1 バックグラウンドの引き方による影響

バックグラウンドの引き方は、いずれの年度についても、

1. 直接引く

2. 上と同じバックグラウンドを SUD ソート¹ によって引く

の 2 つの方式を試みた。なお、SUD ソートでバックグラウンドを引く場合、Crab のような明るいソースではソース自身からの SUD カウントへの漏れ込みが存在するため、普通にやったのでは正しい結果にならない。今回は、漏れ込み強度を見積もって SUD 値を補正している。

まず、バックグラウンドの引き方による影響を知るため、バックグラウンドやその引き方をいろいろ変えて Fitting を行なってみた。その結果を下のテーブルに示す。モデルは、POWL*ABSM (NH はフリーパラメーター) である。

観測年	Background の引き方	Best Fit Parameter (90% error)			
		Normalization η	Photon Index	log NH	red. χ^2 (dof=43)
1987	直接	4.20 ± 0.06	2.070 ± 0.006	21.25 ± 0.07	0.76
	SUD ソート	4.39 ± 0.08	2.091 ± 0.008	21.39 ± 0.06	0.61
1990	直接	4.34 ± 0.06	2.092 ± 0.005	21.55 ± 0.04	0.46
	SUD ソート	4.37 ± 0.08	2.094 ± 0.008	21.26 ± 0.04	0.63
1991	直接	4.29 ± 0.06	2.108 ± 0.006	21.24 ± 0.07	0.93
	SUD ソート	4.35 ± 0.07	2.114 ± 0.007	21.27 ± 0.07	1.07

η : 10^4 photons/keV/sec at 1 keV

87 年では、SUD ソートをする場合としない場合の差が誤差以内におさまらなくなっている。87 年のデータでは、On Source と軌道を合わせたバックグラウンドを使っていないからであろう。たとえ Crab のような明るい天体でもバックグラウンド引きには気を使わなければならないといえる。以降、SUD ソートで作成したスペクトルが正しいと思って議論を進める。

2.2 2-37keV でのレスポンス

次に、レスポンスの経年変化を調べるため、図 2 に各時期の PHA Ratio をしめす。しかし、全く同じ Power Law スペクトルでもエネルギースケールが異なると PHA Ratio

¹SUD の Step 幅は 0.6 counts/sec/sensor

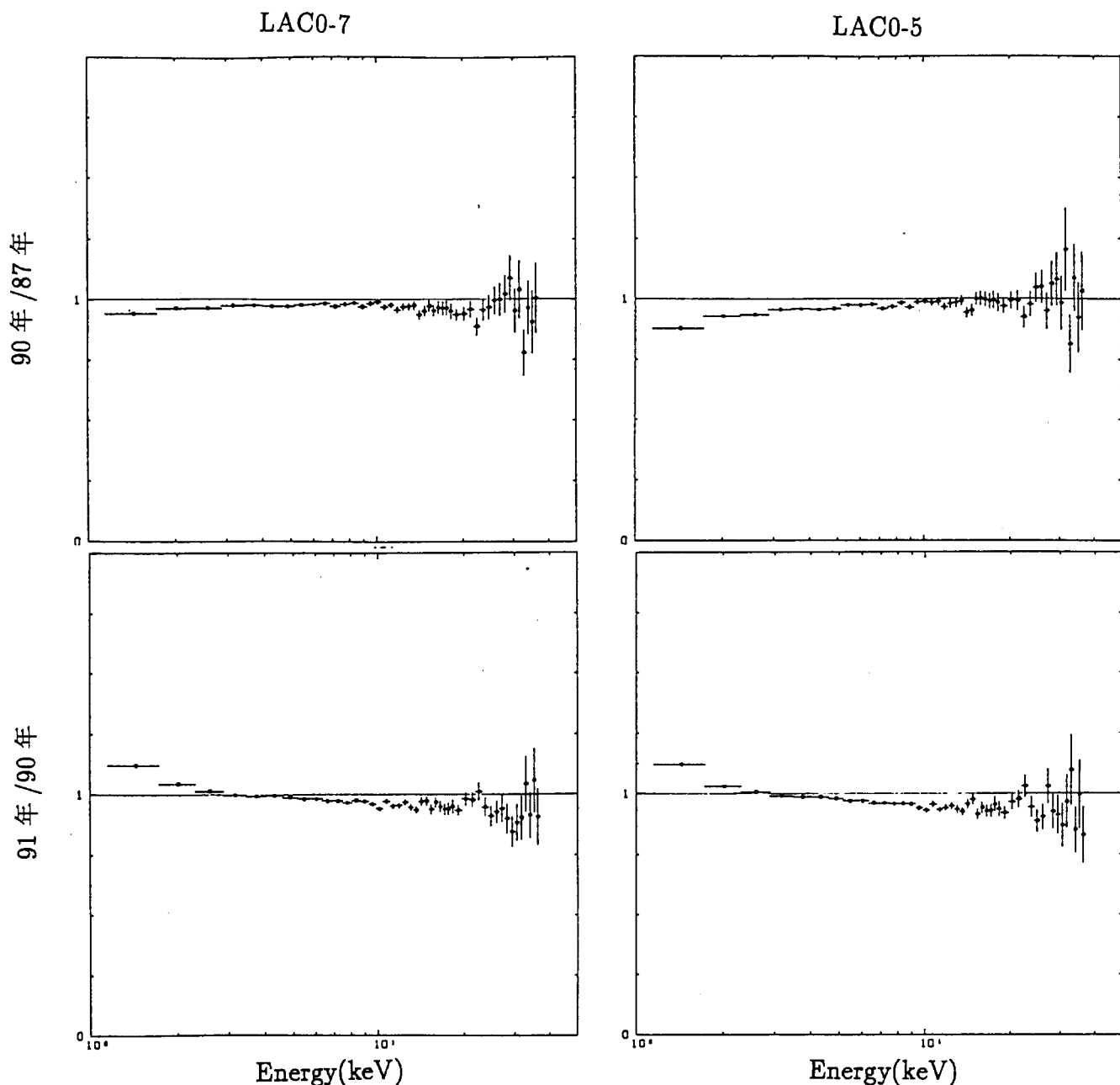


図 2: 各年度間での PHA Ratio。上より、90 年 / 87 年、91 年 / 90 年。
左: LAC0-7 右: LAC0-5

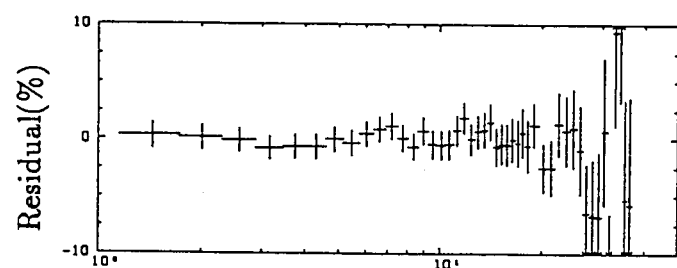
はフラットな直線にならないし、またソフト側ではコリメーターの反射が効いてくるため、これから直接レスポンス変化の判断をするのは難しい。そこで、Fitting 結果で比較を行なうことにする。

まず、全エネルギーバンド (2-37keV) でのレスポンスを調べるため、3-48ch²で Power Law プラス 星間吸収 (Column Density (NH) は Free Parameter とする) での Fitting 結果を考察する。Best Fit での Residual を図 3 に示す。スペクトルは 91 年では Soft 側に少しうねるような構造があるが、それ以外は Power Law でだいたい合っていると言える。

Best Fit Parameter は、以降の結果とまとめて表 1 に示す。Best Fit Parameter の経年変化をみると、これらは 3 つの時期全体にわたって誤差内で一定とは言えない。(2 次元 Fitting Error の Contour が 90% confidence limit で交わらないことを確認した。)しかし、この Fitting ではフリーパラメーターが 3 つあり、NH(Column Density) の値が有意に変化してしまっているの、Power Law のパラメーターが比較しづらい。

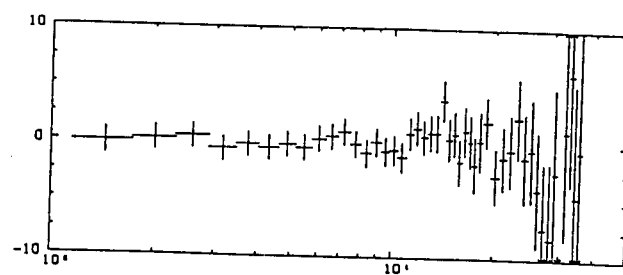
²チャンネルの数は、1ch-48ch (0ch-47ch ではない)

LAC0-7

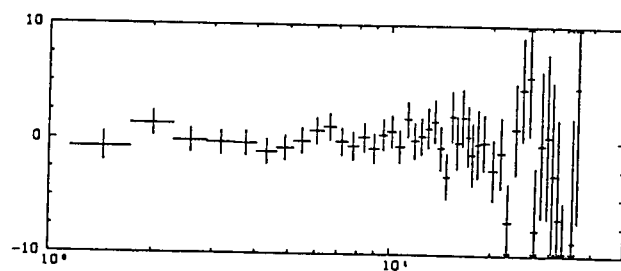
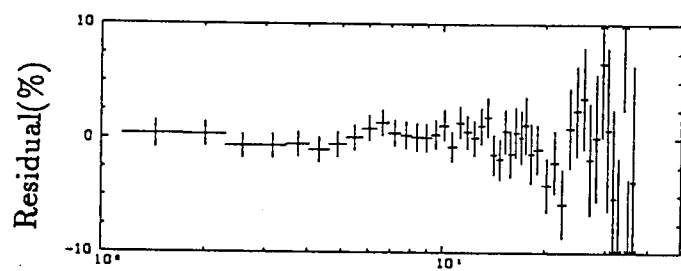


1987

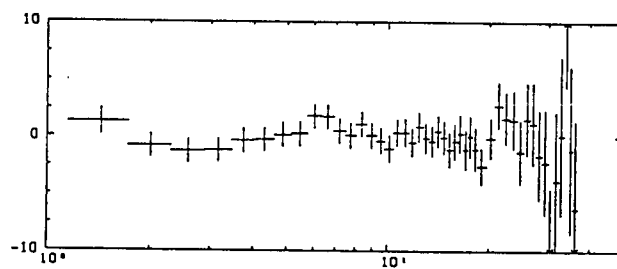
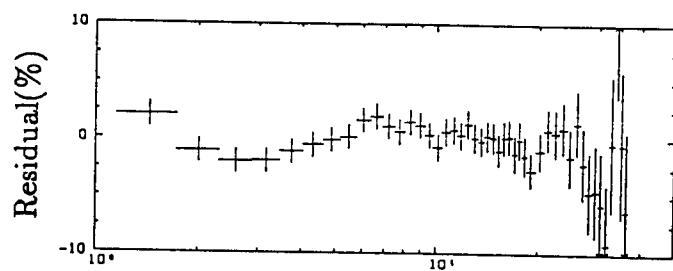
LAC0-5



1990



1991



Energy(keV)

Energy(keV)

図 3: POWL*ABSM(NH Free)でのフィット結果。上より 1987 年、1990 年、1991 年。
左: LAC0-7 右: LAC0-5

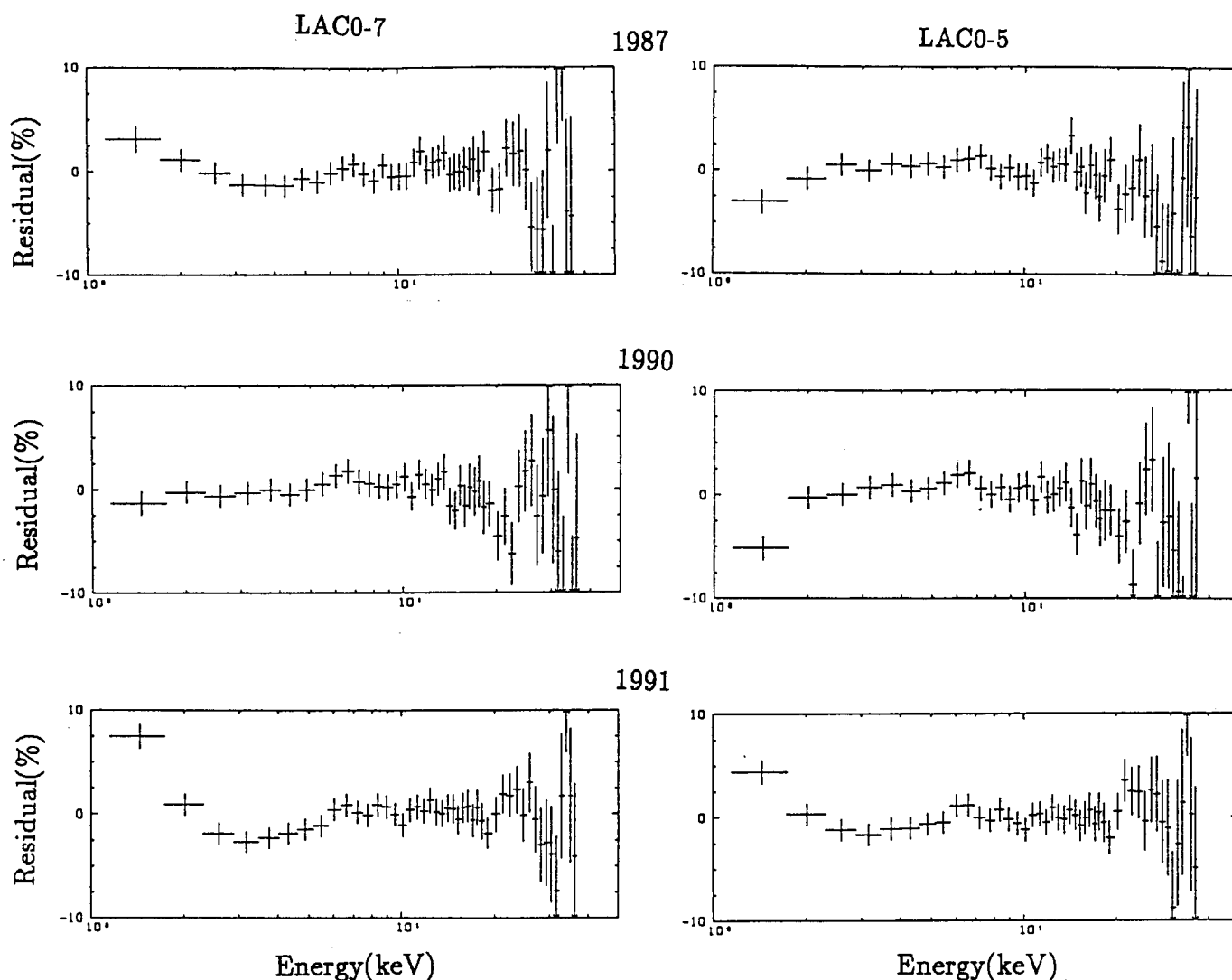


図 4: POWL*ABSM(NH Fixed)でのフィット結果。上より 1987 年、1990 年、1991 年。
左: LAC0-7 右: LAC0-5

そこで、経年変化の原因を調べるため NH の値を固定して Fitting を試みた。NH の値は $3 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ とした (Toor and Seward [1])。結果を図 4 に示す。これによると、87 年と 91 年で 7keV 以下でずれがみられ、特に、大きなプラスの Residual が 3ch に残ることがわかる (順に 3%、8%)。いっぽう、LAC6,7 を除いた結果では、いずれの年も 3ch の Residual は 5% 近くも減少している。この結果から言って、少なくとも 3ch は不安定な振舞いを示すので使用しない方が無難であろう。また、全体的に 7keV 以下では大局的な構造が残り、レスポンス関数は完全に正しいとは言えないようだ。ソフト側のずれの原因として一番考えられるのは、コリメーターの反射補正の失敗である。これについては、節を改めて考察する。

2.3 7-37keV でのレスポンス

つぎは、NH の不確定性とコリメーターの反射補正の不確実性を除くため、両者の影響が無視できる 7keV 以上 (13ch 以上) で星間吸収なしにして Fitting を行なった。もし年

度によって結果が変わっていたら、本当に LAC のレスポンスが経年変化していると言わざるを得ない。

Table1 に結果を示す。それぞれの年度について 2-37keV で求めた Best Fit Parameter と 7-37keV で求めたそれを比較すると、誤差内で一致していることがわかる。しかし年度間でパラメーターを比較すると、systematic な経年変化があるようである。Photon Index が年とともに大きく（すなわちスペクトルが急に）なる傾向がある。特に 90 年から 91 年への変化が大きく、Error Contour は 90% confidence level で交じり合わない(図 5)。また、13ch-48ch の積分強度 (counts/sec) は年とともに有意に減少している。減少率は 87 年から 90 年で 2.6%、90 年から 91 年では 3.8%³である。たしかに、90 年に対する 91 年の PHA Ratio (図 2) は、7keV 以上で 1 より小さくなっている。このような経年変化の傾向は、LAC6, 7 を除いた結果でも変わらない。

8 本のカウンターのうち、どれか一部が激しく変化しているかもしれないので、LAC0~7 について、1 つずつ Fitting を行なった。1.2 で述べたように、1 つのカウンターだけを用いて Fitting するのはあまり正しい方法ではないが、各カウンターの個性を知ることはできる。この結果、ガスの抜けた LAC7 が 90 年から 91 年で激しく変化していることがわかった。傾向は全カウンター加算の結果と同じで、LAC7 単独では Index が ~0.1 も大きくなっていた。これについては、ガスが抜けたため硬 X 線に対する検出効率が減少した、という説明がもっとももらしい。したがって、実際問題としては、少なくとも LAC7 は除いて解析すべきであろう。しかし、LAC6, 7 を除いた結果も、Index が増加し積分強度が下がる傾向は変わらないため、ガスが抜けたことが本質的な要因ではないようである。

2.4 Power Law のパラメーター値について

1987 年について本レポートで得た Fitting 結果⁴は、E(keV) に対する Flux⁵が

$$11.2(\pm 0.4)E^{-2.083 \pm 0.014} \text{photons/keV/cm}^2$$

となった。ところが、M.J.L.Turner et al. [2] によると 7keV 以上の Fitting 結果は

$$9.15(\pm 0.3)E^{-2.08 \pm 0.03} \text{photons/keV/cm}^2$$

となっている。(ちなみに「ぎんが」以前のデータは、Toor and Seward(1974) [1] によると、 $9.7(\pm 1.0)E^{-2.1 \pm 0.03} \text{photons/keV/cm}^2$ である。) Turner の結果と本レポートの結果とを比較すると、Photon Index はよく一致しているが、Normalization は本レポートの値の方がかなり大きくなっている。もっとも Photon Index と Normalization は couple しているので、Photon Index が大きいときは Normalization も引っ張られて大きくなる。(例えば 20keV での Intensity が同じだとして Photon Index が 0.03 増えたとすると、Normalization (Intensity @1keV) は 10% 程度増加する。) M.J.L.Turner et al. [2] でのエラーのつけ方が判然としないため、ここではこの差を指摘するだけにとどめておく。

³同じチャンネルを使用した場合、エネルギースケールの違いによっても積分強度に差が生じるが、4% もの大きな差にはならない。

⁴LAC0-5 に対する結果

⁵全有効面積は 4000cm² として計算した。

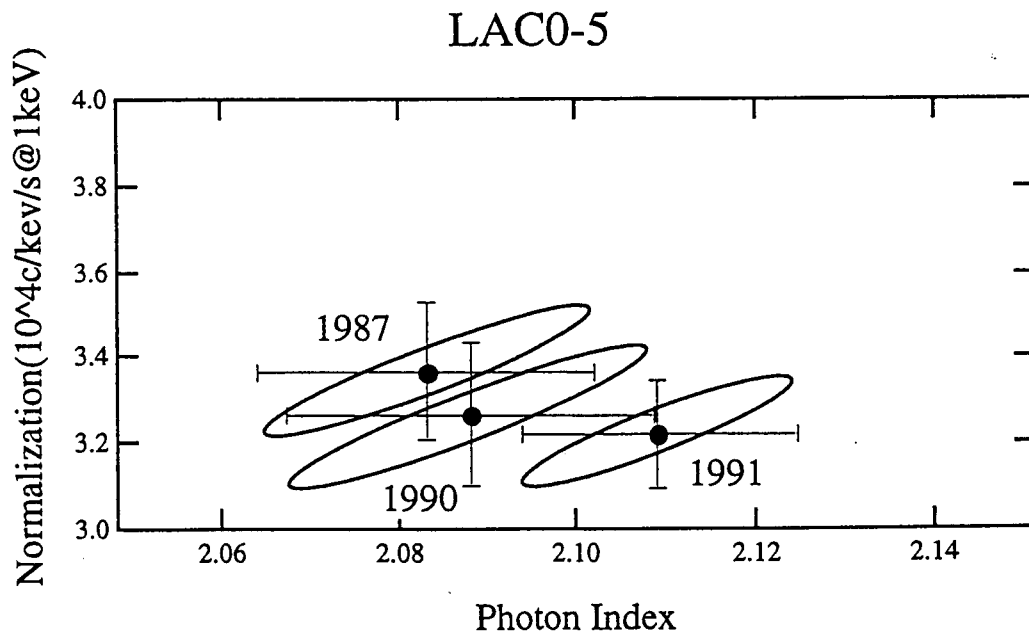
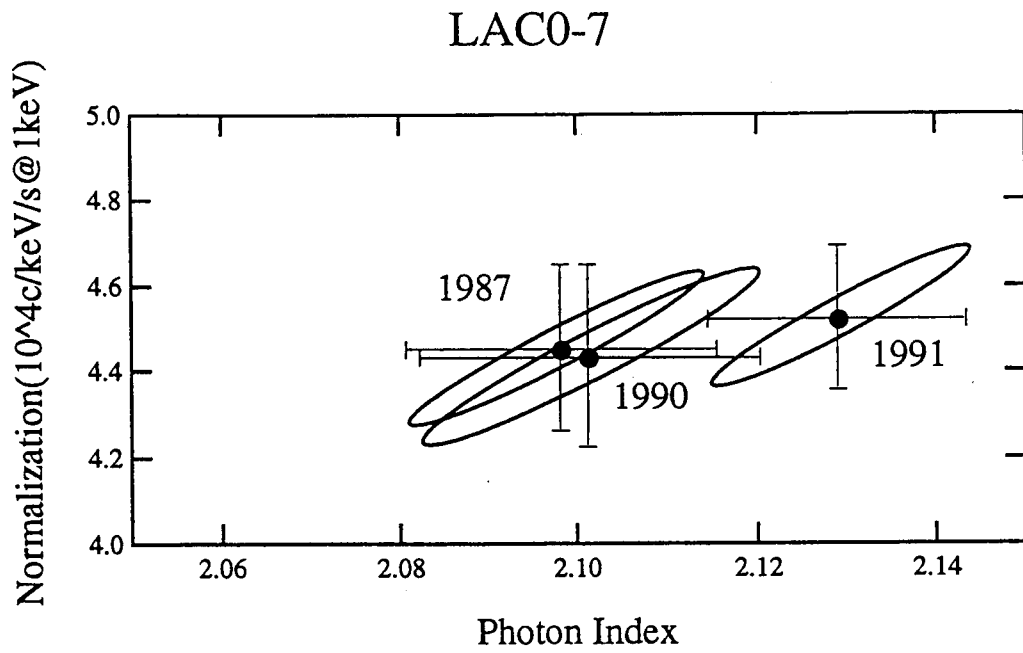


図 5: Power Law のパラメーターに対する 90% confidence level での Error Contour (7keV-37keV での Fitting 結果)。黒丸が Best Fit を表す。上:LAC0-7、下:LAC0-5。

表 1: Fitting 結果

Model(Range)	Counter	Obs.Date	Best Fit Parameter(90%error)			
			Normalization ¶	Photon Index	log NH	red. χ^2
POWL*ABSM NH Free (2-37 keV)	LAC0-7	1987	4.39 ± 0.08	2.091 ± 0.008	21.39 ± 0.06	0.61
		1990	4.37 ± 0.08	2.094 ± 0.008	21.56 ± 0.04	0.63
		1991	4.35 ± 0.07	2.114 ± 0.007	21.27 ± 0.07	1.07
	LAC0-5	1987	3.38 ± 0.06	2.084 ± 0.008	21.60 ± 0.04	0.69
		1990	3.30 ± 0.06	2.091 ± 0.009	21.65 ± 0.04	0.72
		1991	3.21 ± 0.05	2.107 ± 0.007	21.38 ± 0.06	0.68
POWL*ABSM NH Fixed (2-37 keV)	LAC0-7	1987	4.52 ± 0.05	2.104 ± 0.005	21.50	0.86
		1990	4.29 ± 0.05	2.086 ± 0.005	21.50	0.72
		1991	4.57 ± 0.05	2.133 ± 0.005	21.50	2.02
	LAC0-5	1987	3.27 ± 0.04	2.070 ± 0.005	21.50	1.00
		1990	3.12 ± 0.04	2.068 ± 0.006	21.50	1.40
		1991	3.32 ± 0.03	2.120 ± 0.005	21.50	1.00
Model(Range)	Counter	Obs.Date	Normalization ¶	Photon Index	Intensity§	red. χ^2
POWL (7-37 keV)	LAC0-7	1987	4.45 ± 0.14	2.098 ± 0.013	2650	0.66
		1990	4.43 ± 0.15	2.101 ± 0.014	2582	0.62
		1991	4.52 ± 0.12	2.129 ± 0.011	2483	0.54
	LAC0-5	1987	3.37 ± 0.12	2.083 ± 0.014	2002	0.86
		1990	3.26 ± 0.12	2.088 ± 0.015	1954	0.78
		1991	3.22 ± 0.09	2.109 ± 0.011	1854	0.52

¶: 10^4 photons/keV/sec at 1 keV

§: c/s(7-37keV)

2.5 標準レスポンス関数 (RESSETD) に対するまとめ

標準レスポンス関数 (RESSETD) について、Crab Cal の結果をまとめておく。

1. コリメーターの反射補正には少し問題が残っており、7keV 以下に対する LAC のレスポンス関数は完全でない (3 節参照)。また 3 channel (一番下の bin) は不安定な振舞をするので、使用しない方が無難である。
2. LAC7 は 1990 年から 1991 年にかけて激しく特性が変化しているので、1990 年 3 月以降は、LAC7 は除いた方がよい。
3. LAC6,7 以外も、レスポンスが経年変化している可能性がある。1990 年から 1991 年にかけて、Crab のスペクトルの Power Index は ~ 0.02 増加している。

実際問題としては、7 keV 以上のレスポンスの経年変化を完全に把握することは困難であり、レスポンス関数はこのまま使うよりないであろう。したがって、解析をする際には、レスポンスの経年変化が及ぼす影響に注意しなければならない。

3 コリメーター反射補正の問題

ここで、コリメーター反射補正について詳しく調べておく。堂谷さん [5] の指摘どおり反射補正のやり方次第で鉄ラインの見え方が変わってくることがある。そもそもの目的は、著者の解析していた GX339-4 の鉄ラインのパラメーターを正確に決定するためであった。

3.1 反射補正とは

LAC の有効面積が最大になる方向を LAC の視野中心とよぶ。X 線源が LAC の視野中心からずれている場合は有効面積が小さくなり、それとソースが視野中心にある時の有効面積の比を Transmission (透過率) という。普通、スペクトルを作成する時に、Transmission で重みをつけた時間 (Effective Time) でソース強度を計算することになる (Aspect Correction)。Transmission はただコリメーターの形状によって幾何学的に決まるものである。ところが、軟 X 線がコリメーターにあたるとその一部は反射によって LAC に入るため、軟 X 線のカウント数は、Transmission より期待される値よりも実際は大きくなる。したがって、エネルギーやソースの位置に応じてこの分を補正しなければならない。

具体的には、モデルにレスポンスをかけて LAC の各 channel のカウント数を計算する時に、まず 700×48 のレスポンス行列⁶によって各 channel のカウント数を求め、それに反射の補正分の Factor をかけるという方法がとられている。この Factor はエネルギー (channel) およびソースの位置の関数である。当然、反射の効かない硬 X 線 ($\sim 7\text{keV}$ 以上) に対しては、この Factor は 1 となる。

3.2 反射補正の種類と問題点

反射補正 Factor の値は、87 年の Crab Nebula の観測データをもとに決められている。ただし、その方法にもいくつか種類があり、それに対応していくつかレスポンス関数 (レスポンス計算のサブルーチン) がある。まず、各レスポンス関数の特徴と問題点をあげる。

1. ISAS 標準バージョン (RESSETD⁷)

このレスポンス関数は、まず LAC 視野中心からの Target の離角を Azimuth と Elevation より計算し、その離角の 1 次式を使って反射補正をするようになっている。すなわち、各エネルギーチャンネルに対する補正 Factor (変数名:HOSEI) が、

$$\begin{aligned}\text{HOSEI}(1) &= 1.000 \\ \text{HOSEI}(2) &= 1.000 \\ \text{HOSEI}(3) &= 1.006 + 0.1034 * \text{ADIST} \\ \text{HOSEI}(4) &= 0.994 + 0.1330 * \text{ADIST} \\ \text{HOSEI}(5) &= 1.028 + 0.1587 * \text{ADIST} \\ \text{HOSEI}(6) &= 1.022 + 0.1542 * \text{ADIST} \\ \text{HOSEI}(7) &= 1.024 + 0.1447 * \text{ADIST} \\ \text{HOSEI}(8) &= 1.027 + 0.1470 * \text{ADIST}\end{aligned}$$

⁶正確には 700×700 の Matrix をかけたあとで、48 bin に binning して keV から channel に直す

⁷データセット名は PSB237.CSUB1.FORT77(RESSETD)

$$\begin{aligned}
\text{HOSEI}(9) &= 1.027 + 0.1330 * \text{ADIST} \\
\text{HOSEI}(10) &= 1.029 + 0.1003 * \text{ADIST} \\
\text{HOSEI}(11) &= 1.019 + 0.0640 * \text{ADIST} \\
\text{HOSEI}(12) &= 1.004 + 0.0254 * \text{ADIST} \\
\text{HOSEI}(13) &= 1.007 + 0.0280 * \text{ADIST} \\
\text{HOSEI}(14) &= 1.000 \\
\text{HOSEI}(15) &= 1.000 \\
&\vdots \\
\text{HOSEI}(48) &= 1.000
\end{aligned}$$

ただし、

$$\text{ADIST} = |\text{Azimuth} - 90.23| + |\text{Elevation} + 0.08| * 0.5 \quad (1)$$

によって計算される。Azimuth, Elevation は衛星座標でのターゲット位置 (単位 degree) で、LAC 視野中心は衛星座標で (90.23°, -0.08°) に相当する。もともと、この式は Azimuth 方向に Offset がある場合の Calibration Data から作られている。離角 (ADIST) の計算で Elevation の重みが 0.5 になっているのは、単に LAC の視野が Azimuth × Elevation = 1° × 2° であることに基づいている。したがって、式 1 では Elevation 方向だけに Offset がある時も反射補正を行なうことになる。ところが、近藤さん [4] によって指摘されたとおり、実際は Azimuth ~ 0° の時は、Elevation 方向に Offset しても反射成分はほとんど存在しない。そのため、Elevation に Offset がある場合には補正をやりすぎることになり、Fitting をすると反射補正をした channel でマイナスの Residual が残る場合がある (図 6 参照)。この効果は、統計誤差が 1% 以下の場合には無視できない。また、広がったソースの視野全体で積分したスペクトルを議論する場合も問題となる。

2. 近藤新バージョン (RESSETC⁸)

このレスポンス関数では、ISAS 標準バージョン (RESSETD) のような近似式を用いた補正は行なわない。まず、87 年の Crab ラスタースキャン観測のデータから、反射を含めた Transmission の値をあらゆる Azimuth, Elevation についてエネルギーごとに調べ、それをソース位置について 2 次元行列にしたテーブルをデータベースとして用意している。反射補正は、テーブルから該当するソース位置での値を読んで行なう⁹。ただし、RESSETC では全 channel ごとにテーブルは作成しておらず、いくつかの channel をまとめて扱っている。当然、高エネルギー側¹⁰では反射補正をしない。

この近藤新バージョン (RESSETC) を用いると、Elevation Offset の時に反射補正をし過ぎるという問題は解決される ([4])。ところが、もともとラスタースキャンのデータは観測時間が不十分で統計が悪く、テーブルの値は誤差が大きい。一番大きな問題

⁸データセット名は PSB237.CSUB1.FORT77(RESSETC)

⁹厳密に言えば、テーブルを 2 次元補間して、任意の位置について値が計算できるようにすべきであるが、ここでは単に目的の位置に最も近い要素を使用している。

¹⁰17 channel 以上

は、12 channel($\sim 6\text{keV}$) 以上でほとんど反射補正が行なわれていないことである。図 6 に反射補正をしなかった場合の Residual も示すが、実際は 6keV 以上にも反射成分は存在することがわかる。したがって、RESSETC で反射補正を行なうと、 6keV あたりに補正されなかった反射成分が残り、その結果ラインのような構造が生じてしまう。ちょうどエネルギーが $\sim 6\text{keV}$ と鉄ラインに近いので、鉄ラインの解析を行なう場合に重大な支障をきたすことになる。(その例を図 7 に示す。GX339-4(1991 年, Low State) のスペクトルを Power Law で Fit した結果である。近藤新バージョン (RESSETC) を使用した場合、反射による見かけのラインと本物の鉄ラインが混ざり、ライン幅が広がり中心エネルギーが低エネルギー側へシフトしたように見える。) これは、明るい X 線源を解析する場合には致命的な問題である。

3. 名古屋バージョン (RESSETB) ¹¹

近藤新バージョン (RESSETC) を少し修正したもので、もともと主に名古屋大学で使われていたものを ISAS の大型計算機に Install した。RESSETC と異なる点は、 6keV 以下の全ての channel に対し、Transmission のテーブルを用意してあることである。しかし、これも 6keV 以上では反射補正を行なっておらず、ライン構造が生じてしまう問題は解決されていない。(ちなみに名古屋大学では、暗い Diffuse 線源の解析をする時に、このテーブルを使って X 線強度の空間分布で重みをつけた反射 Factor を計算し、ターゲットごとに反射補正のレスポンスを作っているそうである。ソースが暗く統計誤差が十分大きければ、ここで指摘したレスポンス関数の問題も無視できるであろう。)

以上の結果をまとめておく。

- Azimuth 方向に Offset した明るいソースの Pointing については、1 を使えばよい。
- 広がった暗いソースについては 2, 3 を使うのがよい。
- Elevation 方向に Offset した明るいソースの Pointing について、信頼できる反射補正はない。

いろいろなレスポンス関数で 1990 年のデータを Fitting した時の Residual を図 6 に示す。(RESSETX については次節参照。)

3.3 反射補正の改良

そこで、Elevation 方向に Offset した場合にも正しい反射補正を行なえるように、ISAS 標準バージョン (RESSETD) の改良を試みた。まず、LAC の全ての Crab 観測の中から Pointing のデータを集め、さまざまな姿勢において統計の良いスペクトルを作成した。これら全ての姿勢について正しい反射補正を与えるようにすることが目標である。ISAS 標準バージョン (RESSETD) では、Azimuth 方向については正しい補正がなされているが、Elevation 方向で補正をし過ぎているセンスである。補正をし過ぎると、 6keV より下で急に Residual が減り階段状の構造ができてしまい、鉄ラインの解析をする時に問題になる。実際、GX339-4 の解析をそこで、 $5\sim 6\text{keV}$ に生じる systematic な構造をなくすことを第一目標にし、9ch ($\sim 4\text{keV}$) 以上だけで調べた。¹²

¹¹ 著者が勝手に命名した。データセット名は S88267.CSUB1.FORT77(RESSETB)

¹² GX339-4 の解析の都合上

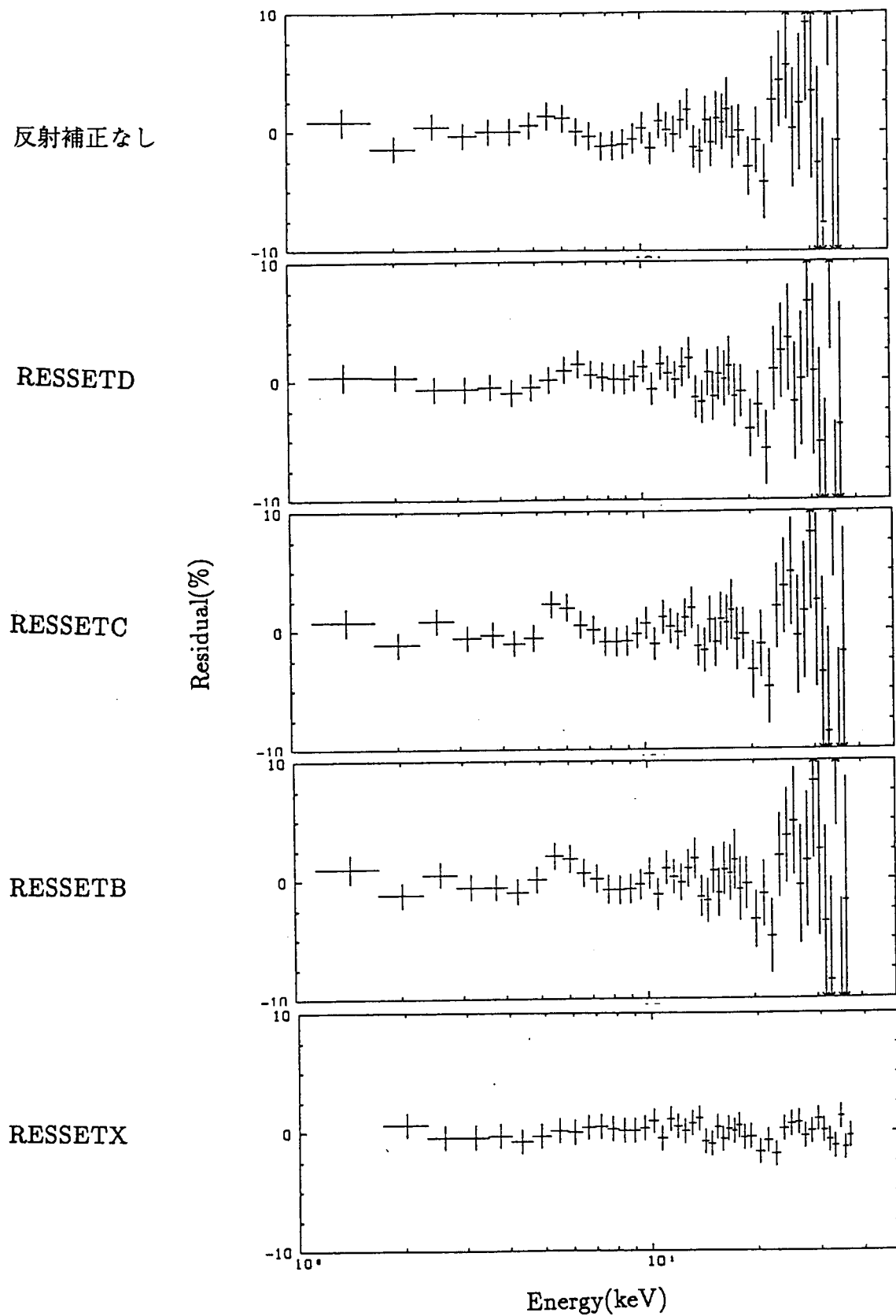
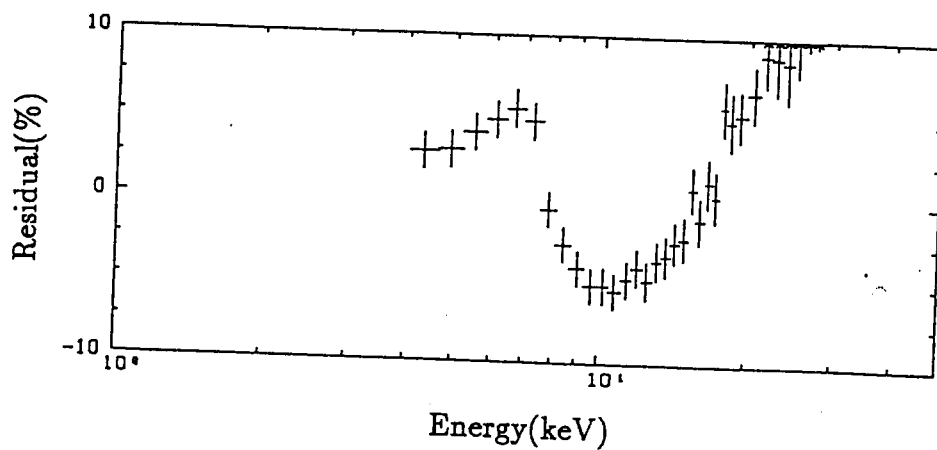
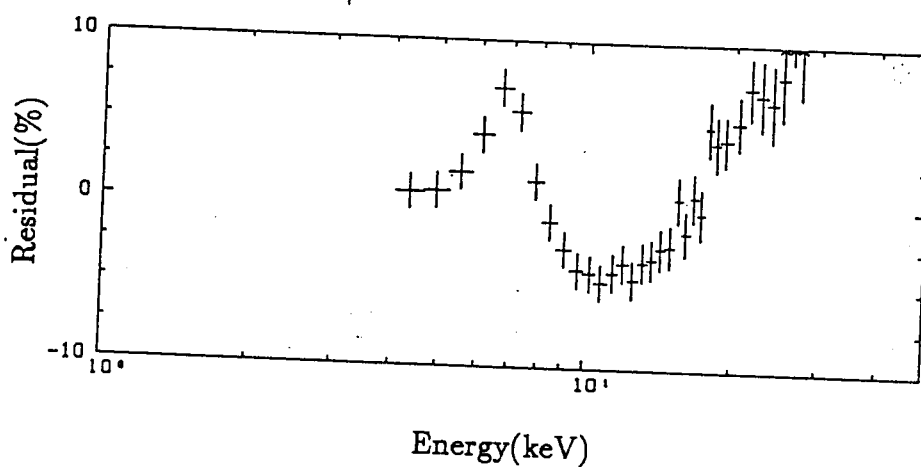


図 6: Crab(1990 年) に対する Fitting Residual(POWL*ABSM, NH free)。
 上より、(反射補正なし)、(RESSETD)、(RESSETC)、(RESSETB)、(RESSETX)。
 RESSETC、RESSETB ではライン構造が生じてしまう。

反射補正なし



RESSETD



RESSETC

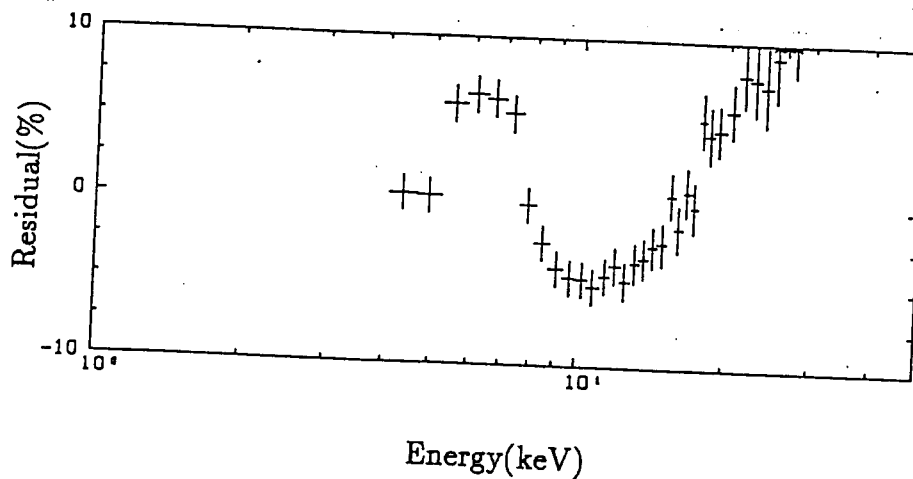


図 7: GX339-4(1991, Low State) に対する Fitting Residual(POWL*ABSM, NH fixed)。上より、反射補正なし、(RESSETD)、(RESSETC)。RESSETC ではライン幅が大きく、低エネルギー側へシフトしたように見える。

ここで紹介する新しいレスポンス関数は

PSB237.CSUB1.FORT77(RESSETX)

である。ここでは、基本的な補正の仕方は変えないまま、補正式 (1) のパラメーターだけを修正している。それも、観測データから全ての反射補正のパラメーターを求め直すことはせず、パラメーターの変更を最小限にとどめながら、経験的に 4 keV 以上においてはほとんど全ての姿勢で反射補正が合うようにした。ただし、4 keV 以下も含めて解析する場合には、このレスポンス関数は必ずしも完全ではないので注意されたい。(実際、ソース位置によっては Fit 結果の NH の値がかなり違ってくることがある。)

具体的には、まず離角の計算で Elevation につけている重みを 0.5 から 0.2 に減らした。0.2 という値は必ずしも最適値であるとは言えないが、経験的にこれで階段状の構造はなくなる。また、11, 12 channel についていつも systematic にプラスの Residual が残る傾向があり、反射補正が足りないようであった。この傾向は LAC の視野中心に近い位置でも同じである。そこで、11, 12 channel に対する補正 Factor の定数パラメーター (HOSEI は離角の 1 次式で与えられるが、その定数部分) を 0.01 だけ増やし、補正量を大きくした。¹³ この結果、~ 6 keV 付近にわずかに残っていたライン様の構造もほとんどなくすることができた。新しい補正式は

```
HOSEI( 1) = 1.000
HOSEI( 2) = 1.000
HOSEI( 3) = 1.006 + 0.1034 * ADIST
HOSEI( 4) = 0.994 + 0.1330 * ADIST
HOSEI( 5) = 1.028 + 0.1587 * ADIST
HOSEI( 6) = 1.022 + 0.1542 * ADIST
HOSEI( 7) = 1.024 + 0.1447 * ADIST
HOSEI( 8) = 1.027 + 0.1470 * ADIST
HOSEI( 9) = 1.027 + 0.1330 * ADIST
HOSEI(10) = 1.029 + 0.1003 * ADIST
HOSEI(11) = 1.029 + 0.0640 * ADIST (cf. RESSETD : 1.019 + 0.0640 * ADIST)
HOSEI(12) = 1.014 + 0.0254 * ADIST (cf. RESSETD : 1.004 + 0.0254 * ADIST)
HOSEI(13) = 1.007 + 0.0280 * ADIST
HOSEI(14) = 1.000
HOSEI(15) = 1.000
      |
HOSEI(48) = 1.000
```

ただし、

$$ADIST = |Azimuth - 90.23| + |Elevation + 0.08| * 0.2$$

$$(cf. RESSETD : |Azimuth - 90.23| + |Elevation + 0.08| * 0.5)$$

Elevation Offset での Crab の Pointing データを下の表にまとめる。また、それらに対する RESSETD と RESSETX での Fitting Residual を図 8 に示す。

¹³ この変更は、systematic error である 1% 以下の範囲で行なっているので、許される操作であると言える。

Data No.	mean position of Crab		Transmission
	Azimuth-90.23°	Elevation+0.08°	
1	0.135	0.08	0.916
2	0.135	-0.14	0.867
3	0.135	-0.17	0.854
4	0.135	-0.28	0.801
5	0.145	-0.38	0.745
6	0.145	-0.45	0.704
7	0.145	-0.49	0.680
8	0.155	-0.59	0.620
9	0.165	-1.20	0.258
10	0.225	-1.58	0.085

図8を見ればわかるとおり、RESSETXでは ~ 6 keVでの構造が消えている。ただし、Transmissionが極端に低い場合(Data No. 9, 10)は完全に補正できない。これ以外のデータも含めて判断すると、Transmissionが50%以下の場合に正しい反射補正を行なうことは困難である。(これはRESSETDでも同様である。)

さて、反射補正を変えることにより、実際にどう解析結果が変わるか、GX339-4(Low State)での例を示しておく。あるモデルでFitした鉄ラインのBest Fit Parameterを古い反射補正(RESSETD)と新しい反射補正(RESSETX)の2つの場合について示す。

GX339-4		Best Fit Parameter for Iron Line	
Observation Date	Response Function	$N_{line}^{\dagger}$	$E_{line}^{\ddagger}$
1991/09	RESSETD	9.0 ± 3.6	6.38 ± 0.23
	RESSETX	6.4 ± 3.6	$6.46^{+0.31}_{-0.35}$
1989/09	RESSETD	$1.1^{+0.31}_{-0.45}$	6.42 ± 0.20
	RESSETX	0.95 ± 0.33	6.54 ± 0.22

All the errors are single-parameter 90 % confidence limits.

$\dagger$: Normalization (photons/sec)

$\ddagger$: line center energy (keV)

誤った反射補正では、鉄ラインの中心エネルギーが低めにでることわかる。状況によってはラインがRed Shiftしていると間違える可能性もあり、危険である。

Transmission

RESSETD

RESSETX

0.916

0.867

0.854

0.801

0.745

0.704

0.680

0.620

0.258

0.085

Residual(%)

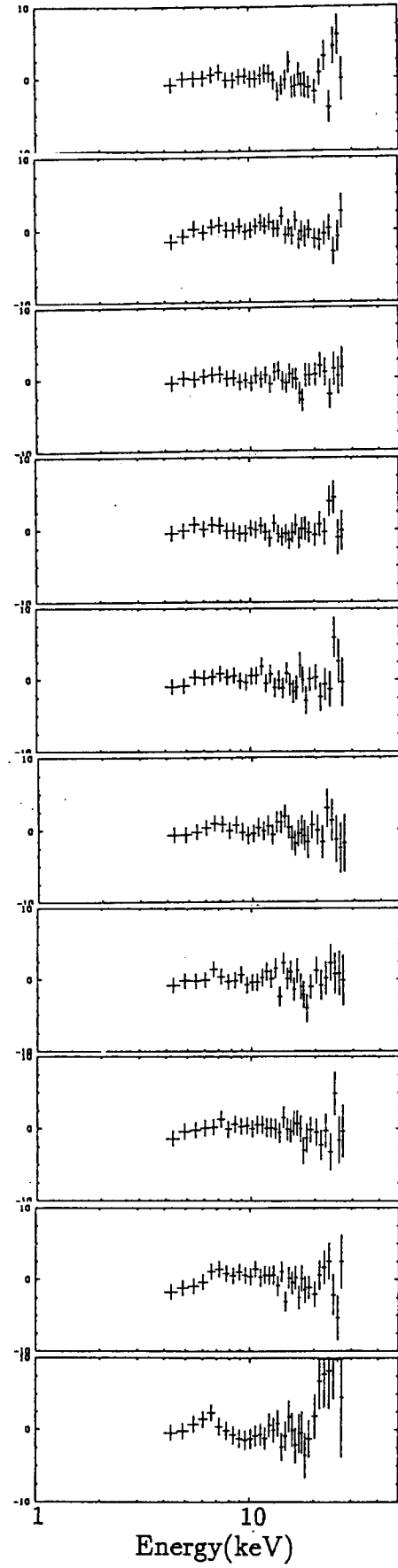
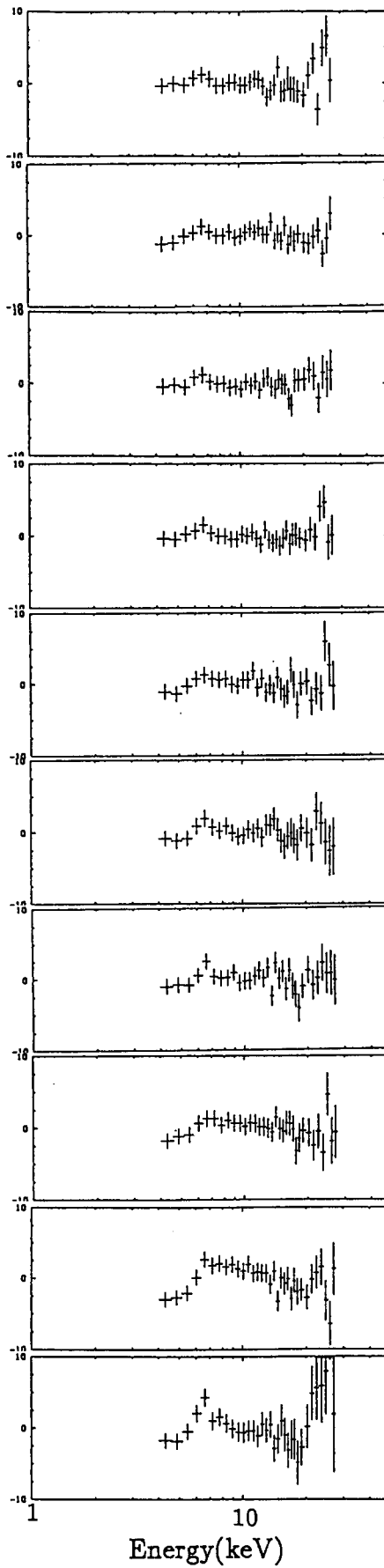


図 8: Elevation Offset 観測に対する Fitting Residual (POWL*ABSM, NH fixed)。下に行くほど Offset が大きい。左:RESSETD、右:RESSETX。

3.4 姿勢が時間変化している場合について

ここで、姿勢の時間変動がある場合の反射補正について考察する。t を Live Time ¹⁴、時間 t におけるソースの位置 (Azimuth, Elevation) を az(t), el(t)、Transmission を tr(t)、n channel でのソース強度を I_n(t) counts/sec とする。トータル Live Time は T_{liv} ≡ ∫ dt、トータル Effective Time は T_{eff} ≡ ∫ tr(t)dt で与えられる。さて、任意の姿勢における反射 Factor が、

$$\begin{aligned}\text{HOSEI}(n) &= \alpha_n + \beta'_n * \text{ADIST} \\ &= \alpha_n + \beta_n * |az - 90.23| + \gamma_n * |el + 0.08|\end{aligned}\quad (2)$$

で正しく記述できるとすると (式 1 参照)、姿勢の時間変動がある時の n channel における平均反射 Factor は、

$$\begin{aligned}\overline{\text{HOSEI}(n)} &= \frac{(\text{counts with reflection})}{(\text{counts without reflection})} \\ &= \frac{\int \text{HOSEI}(n) * \text{tr}(t) * I_n(t) dt}{\int \text{tr}(t) * I_n(t) dt}\end{aligned}$$

観測時間中、ソース強度 I_n が一定、かつ (Azimuth(t) - 90.23°) および (Elevation(t) + 0.08°) の符合が変わっていない場合、

$$\begin{aligned}\overline{\text{HOSEI}(n)} &= \frac{\int \{\alpha_n + \beta_n * |az(t) - 90.23| + \gamma_n * |el(t) + 0.08|\} \text{tr}(t) dt}{\int \text{tr}(t) dt} \\ &= \alpha_n + \beta_n * \left| \frac{\int az(t) \text{tr}(t) dt}{T_{\text{eff}}} - 90.23 \right| + \gamma_n * \left| \frac{\int el(t) \text{tr}(t) dt}{T_{\text{eff}}} + 0.08 \right| \\ &= \alpha_n + \beta_n * |\bar{az} - 90.23| + \gamma_n * |\bar{el} + 0.08|\end{aligned}\quad (3)$$

ここで

$$\bar{az} \equiv \frac{\int az(t) \text{tr}(t) dt}{T_{\text{eff}}}, \quad \bar{el} \equiv \frac{\int el(t) \text{tr}(t) dt}{T_{\text{eff}}}$$

は、それぞれ Azimuth, Elevation についての、Transmission で重みをつけた時間平均 (= Effective Time 平均) を表す。式 2 と式 3 を比較すればわかるように、姿勢の時間変動のあるスペクトルについては、az, el の代わりに $\bar{az}, \bar{el}$ を用いて反射補正を行なえばよい。

衛星座標でのソース位置は、スペクトルファイルの 'UTAG' というキーワードのあとに書かれており、反射補正の参照パラメーターに用いられる。現在使われているプログラム (LACSPEC2) では、また姿勢の時間変動がある場合、この値はただの時間平均 (正確に言えば Live Time 平均 $\int az(t) dt / T_{\text{liv}}$, $\int el(t) dt / T_{\text{liv}}$) を表す。しかしここで証明したように、正しい反射補正のためには 'UTAG' は Effective Time 平均を使うべきである。そこで、'UTAG' を Effective Time 平均として計算する新しいジョブコンを

S88267.J.CNTL(LACSPECU)

に作成した。ただし、姿勢が変動している時にこれが正しい反射補正を与えるのは、

¹⁴Dead Time Correction をした時間

1. 観測時間中、ソース強度 I_n が一定、かつ

2. $(\text{Azimuth}(t) - 90.23^\circ)$ および $(\text{Elevation}(t) + 0.08^\circ)$ の符合が観測時間中に変わっていない場合

に限られる。つまり、ソースが LAC 視野を大きく動いているような場合には、使えないので注意されたい。¹⁵

3.5 反射補正のまとめ

- 明るい点源に対して 4 keV 以上で解析する場合、レスポンス関数として

PSB237.CSUB1.FORT77(RESSETX)

を使うのがよい。ただし、Transmission が $\sim 50\%$ より小さいデータは使わない方がよい。

- 姿勢が時間変動している場合は、ソース位置 ('UTAG') の計算方法を変えるべきで、

S88267.J.CNTL(LACSPECU)

を用いてスペクトルを作成する方がよい。ただしこれも、ソースが LAC の視野を大きく動いている場合¹⁶には対応していない。

¹⁵ これは、反射補正式で絶対値が使われていることに起因する。任意の姿勢変動に対して対応させることは可能であるが、プログラムの修正が必要である。

¹⁶ 正確な条件は本文参照

参考文献

- [1] Toor,A.,and Seward, F.D. 1974,*Astron. J.*,79,995.
- [2] Turner,M.J.L et al. 1989,*PASJ*,41,345.
- [3] 近藤秀治、修士論文、1988、東京大学
- [4] 近藤レポート 「コリメーターの反射成分の補正について」
- [5] 堂谷忠靖 ぎんが解析レポート 「コリメーター反射の補正と鉄ライン」 1992/02/26