

概要

2005年打ち上げ予定の Astro-E2 衛星に搭載される硬X線検出器の中の Anti 検出器は、独自にトランジェント天体やX線バーストなどを全方位観測でモニターできると予想される。全方位観測とはその名のとおり全方位からのX線やγ線を観測し、各天体によって衛星や地球との位置関係で観測できない期間(地食)が違っているのを利用して、どの方向からどんなエネルギーの光がどれだけ来ているかを見分ける方法である。

本研究では Anti 検出器で全方位観測が可能なことを確かめるために、地球の周りを回転する衛星に光子を入射するシミュレーターを構築した。このシミュレーターは過去の衛星で観測された天体とバックグラウンドを発生させるプログラムと検出器シミュレーターに分けられる。このシミュレーターの結果から感度を推定し、長期間モニターを続けることで全方位観測を行なえる感度を持っていることがわかった。

目次

第1章	序論	3
1.1	Astro-E2 搭載 HXD 検出器	3
1.1.1	概要	3
1.1.2	Anti 検出器	3
1.2	トランジェント天体	4
1.2.1	硬X線トランジェント	4
1.2.2	軟X線トランジェント	4
第2章	地食を利用した全方位観測	5
2.1	BATSE	5
2.1.1	構成	5
2.1.2	地食効果	6
2.2	宇宙線バックグラウンドの影響	6
2.2.1	ガンマ線バックグラウンドの概要	8
2.2.2	衛星外部から来るガンマ線バックグラウンド	8
2.2.3	放射化ガンマ線バックグラウンド	9
2.3	本論文の目的	10
第3章	観測シミュレーターの構築	11
3.1	シミュレーターの概要	11
3.2	座標系	11
3.3	衛星の位置	12
3.4	天体のシミュレーション	13
3.4.1	シミュレーションに用いる天体	13
3.4.2	地食の判定	13
3.4.3	光子を出す天体の決定	14
3.4.4	光子のエネルギー	14
3.4.5	光子の発射位置と方向	15
3.4.6	発生させる粒子の数	15
3.5	バックグラウンドのシミュレーション	15
3.5.1	衛星の位置によるスペクトルの変化	15
3.5.2	粒子の発生方法	16
3.5.3	換算時間	16
3.6	検出器シミュレーター	16
第4章	感度計算	17
4.1	Crab をシミュレートするプログラム	17
4.2	バックグラウンドのプログラム	18

4.3.1	感度の式	19
4.3.2	Crab のカウントレート	20
4.3.3	Crab の感度	20
第 5 章 まとめ		21

第1章 序論

1.1 Astro-E2 搭載 HXD 検出器

1.1.1 概要

Astro-E2 は 2000 年に打ち上げが失敗した日本の X 線天文衛星 Astro-E をベースに、設計を大きく変えない範囲で改良がなされ、2005 年の打ち上げを目指している。Astro-E2 に搭載される HXD 検出器は、GSO シンチレータを主検出部とした井戸型フォスウィッチ構造と Si 半導体検出器 (PIN) を組合せ、さらに主検出部の周りを囲むアンチカウンターによる超低バックグラウンド化を行なうことで 10 ~ 500keV 付近で非常に高い検出感度を実現しており、広島大学も開発に参加している。

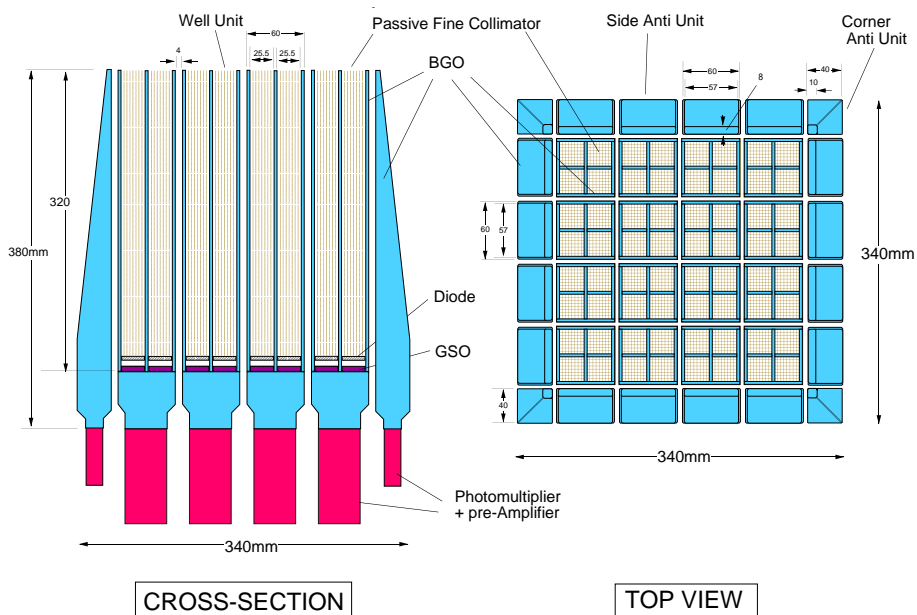


図 1.1: HXD 検出器 断面図 (左) と上から見た図 (右)

1.1.2 Anti 検出器

HXD の主検出部を囲むように配置された Anti 検出器は、PIN と GSO からなる主検出器に対して荷電粒子などのバックグラウンドや視野外からの X 線を取り除くアクティブシールドの役割を果たし、検出器の超低バックグラウンドを実現する。しかしその一方で、広い面積をもつ厚い BGO 結晶で構成される Anti 検出器は高いエネルギー領域でも大きい有効面積を持ち、全方位観測ができるので独自にガンマ線バーストやトランジェント天体の観測を行なうこともできる。Anti 検出器は図 1-2 に示す形をしており、面積は 1100cm²、各エネルギーでの有効面積は図 1-3 のようになっている。300keV ~ 10MeV では過去最高の有効面積をもっている。

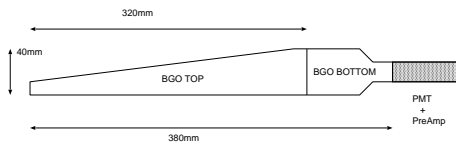


図 1.2: Anti 検出器を横から見た図

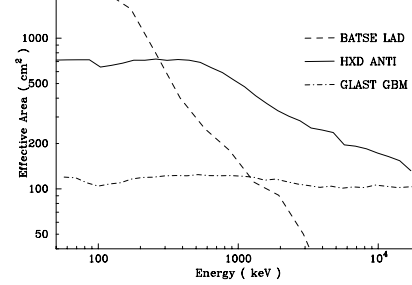


図 1.3: Anti 検出器と BATSE, GLAST の有効面積

Anti 検出器からの信号は光電子増倍管で読み出され、プリアンプで電流信号を電圧に変換し、HXD-AE の TPU に送られる。HXD-AE では波形の整形を行なったあとに AD 変換される。Anti 検出器の一つの辺を構成する 4 つの Anti 検出器の信号は加算されて、1 秒ごとのパルスハイト分布 (64ch, 50keV ~ 8MeV) として HXD-DE に送られる。HXD-DE 部は地上へのデータ送信のための処理を行なう。

1.2 トランジェント天体

トランジェント天体とは光度が突発的に明るくなる天体のことで、特に X 線領域ではスペクトルの形から硬 X 線トランジェントと軟 X 線トランジェントに分類されている。

1.2.1 硬 X 線トランジェント

硬 X 線型のトランジェント天体はほとんどが恒星と中性子星の連星 X 線パルサーであることがわかっている。公転周期が数十日から数百日と長く大きな楕円軌道を描いているため星とパルサーの距離が小さくなったときに中性子星に流れ込むガスが増え X 線の強度が増していると考えられる。

1.2.2 軟 X 線トランジェント

軟 X 線型のトランジェント天体も高密度星との連星系だが、硬 X 線型と違い再帰の期間が数年から数十年と長く、きれいな周期性は見られない。この再帰性の原因はまだよくわかっていないが恒星が何らかの原因でガスを急に放出する時期が繰り返されているのではないかとわれている。軟 X 線型にはいくつかブラックホール候補が見つかっており、特に軟らかい X 線スペクトルのものは高密度星がブラックホールであることがわかっている。Anti 検出器ではこのタイプのトランジェント天体が多く検出されると考えられており、未知のブラックホール候補の発見が期待されている。

第2章 地食を利用した全方位観測

視野の十分に広い観測装置を積んだ衛星を使えば、地食を利用して全方位観測を行なうことができる。その原理を BATSE を例に示す。

2.1 BATSE

2.1.1 構成

BATSE とは 1991 年に打ち上げられた NASA のガンマ線観測衛星 CGRO に搭載された八つの検出器による観測装置。衛星の角に八面体の形に配置された検出器はそれぞれ、面積が広い方向決定用の LAD と感度の高いスペクトル取得用の SD のペアになっている。BATSE では LAD によって全方位観測がなされた。LAD は NaI を使用した検出器で面積は 2025cm^2 、有効面積は図 1-3 にあるように 100keV 以下で非常に高かった。なお CGRO は 2000 年に再突入作業が行なわれ燃え尽きた。



図 2.1: CGRO の外観。角にあるのが BATSE

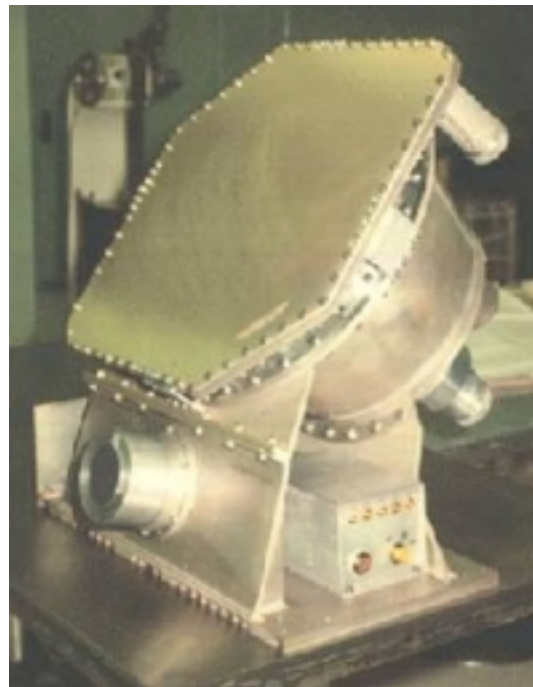


図 2.2: LAD(上) と SD(下)

1	1E1024-57	156.49	-57.81	33	GRS 1009-45	153.40	-45.08
2	1E1740-29	265.98	-29.72	34	GRS 1758-258	270.30	25.74
3	2CG135-18	37.81	61.20	35	GRS 1915-105	288.82	10.97
4	3C273	187.28	2.05	36	GS 2023-338	306.02	33.87
5	3C279	194.05	-5.79	37	GX1-4	263.01	-24.75
6	4U0115-634	19.63	63.74	38	GX301-2	186.66	62.77
7	4U1145-61	176.99	-62.21	39	GX312-1	215.30	-62.70
8	4U1543-45	236.79	-47.67	40	GX339-4	255.71	48.79
9	4U1608-522	243.18	-52.42	41	GX354-0	263.00	33.84
10	4U1627-673	248.07	-67.46	42	HD32918	74.58	-75.28
11	4U1700-37	255.99	-37.84	43	Her X-1	254.46	35.34
12	A0535-262	84.73	26.32	44	HR1099	54.20	0.59
13	A0620-00	95.69	-0.35	45	M51	202.47	47.20
14	A1118-616	170.24	-61.92	46	M82	148.97	69.68
15	Aquila X-1	287.82	0.58	47	MCG8-11-11	88.72	46.43
16	ARLACERT	332.17	45.74	48	MRK421	166.11	38.21
17	ASM2000-25	300.53	25.14	49	NGC1275	49.95	41.51
18	Cen R A	201.47	-42.97	50	NGC253	11.88	-25.29
19	CenX-3	170.31	-60.62	51	NGC4151	182.60	39.51
20	Cir X-1	230.17	-57.17	52	NGC5548	214.50	25.13
21	CRAB	83.63	22.01	53	NOVA CYG	307.63	52.63
22	Cyg X-1	299.59	35.20	54	NOVA MUSCAE	171.61	-68.68
23	Cyg X-2	326.17	38.32	55	NOVA SAG	272.74	-32.22
24	Cyg X-3	308.11	40.96	56	OAO1657-415	255.20	-41.67
25	EXO1846-31	282.30	-3.10	57	PKS2155-30	329.72	-30.23
26	EXO2030-375	308.06	37.64	58	PSR1259-63	195.70	-63.84
27	GEMINGA	98.48	17.77	59	PSR1509-58	228.48	-59.14
28	GROJ0422-32	65.43	32.91	60	SCOX-1	244.98	-15.64
29	GROJ1008-57	152.44	-58.27	61	SCTX-1	279.18	-7.58
30	GROJ1655-40	253.50	-39.85	62	SMCX-1	19.27	-73.44
31	GROJ1719-24	259.93	-25.01	63	Vela X-1	135.53	-40.55
32	GRS0834-430	129.16	-43.26	64	WR140	305.12	43.85

表 2.1: BATSE で観測された天体リスト

2.1.2 地食効果

CGRO は約 90 分で地球を一周していた。そのため衛星と地球の位置関係によって衛星から見て天体が地球に隠されることが繰り返される（地食）。全方位観測をした場合、この影響は図 2-3 のように現れる。つまり、検出器には全天からのガンマ線が常に入ってくるので普段は個々の天体の情報は区別できないが、地食した天体があると全体のカウントレートが少し減り、その減り具合から明るさが、また減った時刻の衛星の位置の情報から天体の方向がわかる。つまりこの図を調べることでどの方向からどれだけの強度で光が発せられているのかわかる。BATSE の LAD はこの方法で 60 以上の X 線源を同時に長期にわたって観測し続けた（表 1）。例として、図 2.4 と 2.5 にブラックホール天体 Cyg X-1 の長期的ライトカーブと X 線スペクトルの変化を示す。

2.2 宇宙線バックグラウンドの影響

打ち上げ後の衛星は常に高カウントレートの宇宙線バックグラウンドにさらされている。そのため検出器の観測感度はバックグラウンドによって決まる。以下では Anti 検出器で特に重要となるガンマ線バックグラウンドについて述べる。

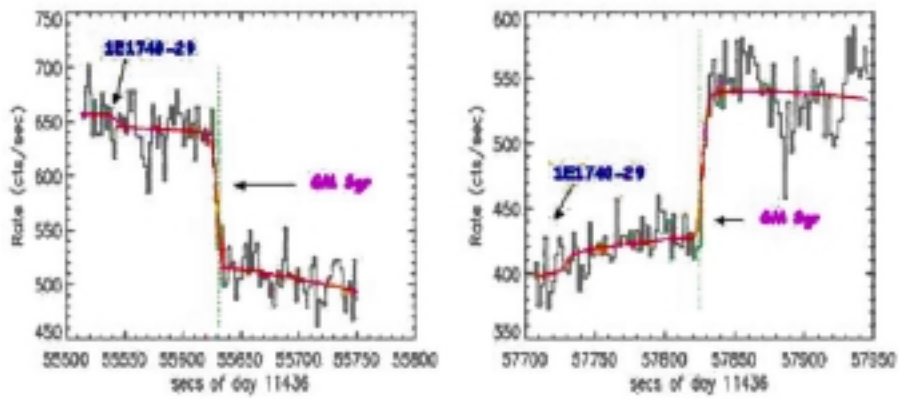


図 2.3: 地食による変化

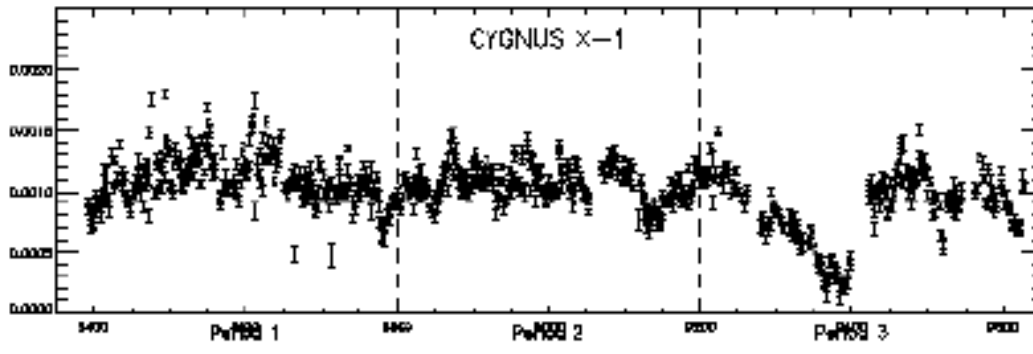


図 2.4: BATSE で観測された Cyg X-1 の X 線強度の長期的な変動

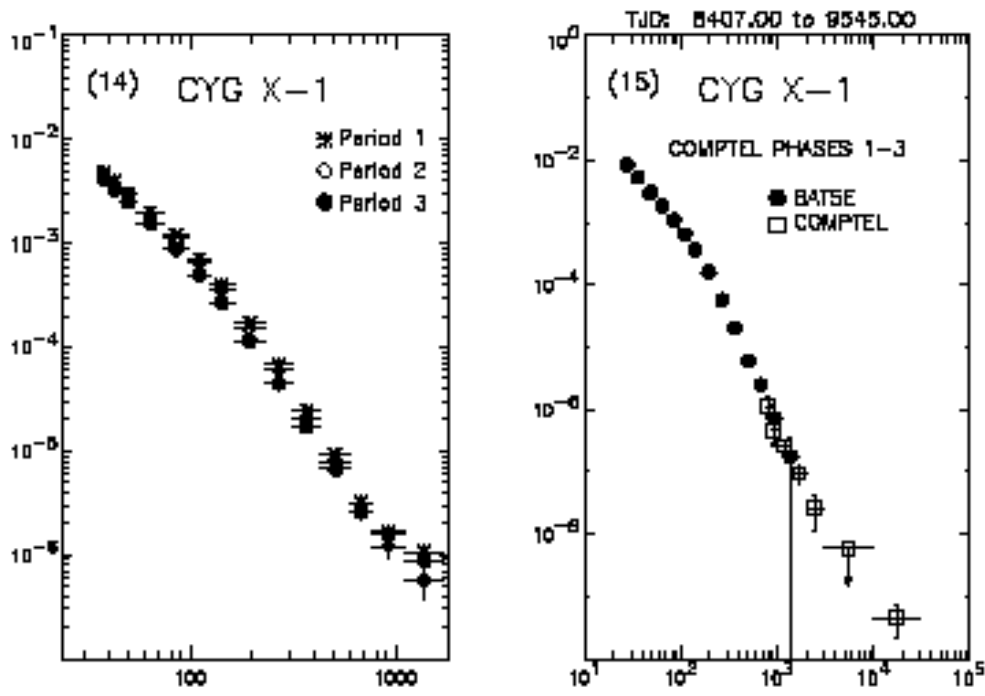


図 2.5: BATSE で観測された Cyg X-1 のスペクトル

ガンマ線バックグラウンドは

1. 衛星外部から来るガンマ線
2. 宇宙線と衛星自体の相互作用で発生するガンマ線
3. 宇宙線との相互作用で検出器内に作られる放射性同位体の出すガンマ線

の3つに大別できる。(1)は primary と secondary に分けられ、primary は太陽系外から直接地球にやってくるガンマ線で、secondary は宇宙線粒子と地球の大気が相互作用して発生させる二次ガンマ線のこと。secondary はさらに、地球から向かってくる upward と地球に降り注ぐ downward に分類される。

(2)は他のガンマ線バックグラウンドよりカウント数がずっと小さいので今回はシミュレーターには加えなかった。

2.2.2 衛星外部から来るガンマ線バックグラウンド

ガンマ線の primary は多数の遠方の天体の出すガンマ線の和と考えられており、外的な影響をほとんど受けずに地球に届き、そのスペクトルモデルは、

$$J_{primary} [/\text{s}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{MeV}] = \begin{cases} 570.8 \times E^{-1.86} & 30 < E < 50\text{keV} \\ 40.0 \times E^{-2.75} & 50 < E < 1000\text{keV} \\ 40.0 \times E^{-2.15} & 1\text{MeV} < E < 100\text{GeV} \end{cases} \quad (\text{式 2.1})$$

と与えられている。ただし、ここでの E の単位は MeV。

secondary は過去の気球実験から

Downward

$$J_{secondary} [/\text{s}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{MeV}] = \begin{cases} 250.0 \times E^{-1.34} & 30 < E < 1000\text{keV} \\ 250.0 \times E^{-1.70} + 1.14 \times 10^5 E^{-2.50} e^{(E/120\text{MeV})^{-1.50}} & 1 < E < 1000\text{MeV} \\ 2.15 \times E^{-2.20} & 1 < E < 100\text{GeV} \end{cases} \quad (\text{式 2.2})$$

Upward

$$J_{secondary} [/\text{s}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{MeV}] = \begin{cases} 1670 \times E^{-1.34} & 30 < E < 1000\text{keV} \\ 1670 \times E^{-1.70} & 1 < E < 1000\text{MeV} \\ 5.29 \times 10^4 \times E^{-2.20} & 1 < E < 100\text{GeV} \end{cases} \quad (\text{式 2.3})$$

と与えられているが、secondary は地磁気の影響を強く受けるためそれを考慮する必要がある。これは第3章のバックグラウンドのシミュレーションで詳しく述べる。

検出器に高い運動エネルギーをもった荷電粒子が入射すると検出器を構成する原子の核と反応して放射性同位体が生成される。この同位体が崩壊する際に発生するガンマ線などが検出器で観測されると、取り除くことのできないバックグラウンドになる。軌道上のバックグラウンドではこの放射化ガンマ線バックグラウンドの占める割合が一番大きい。

放射性同位体を作る原因の荷電粒子のほとんどはブラジル上空のSAAと呼ばれるところにある陽子で、一日で生成される放射性同位体の数はSAAでの陽子のスペクトル [$\text{cm}^2/\text{s}/\text{day}$] とBGOの断面積をそれぞれのエネルギーで掛け合わせて積分することで得られる。

今回のシミュレートでは川添修論の結果を用いた。一日での変動を無視し同位体が放射平衡に達していると仮定して一定の値をとっている。

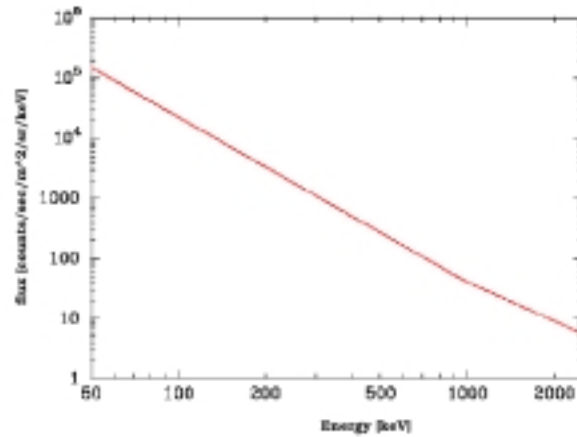


図 2.6: 一次成分モデル

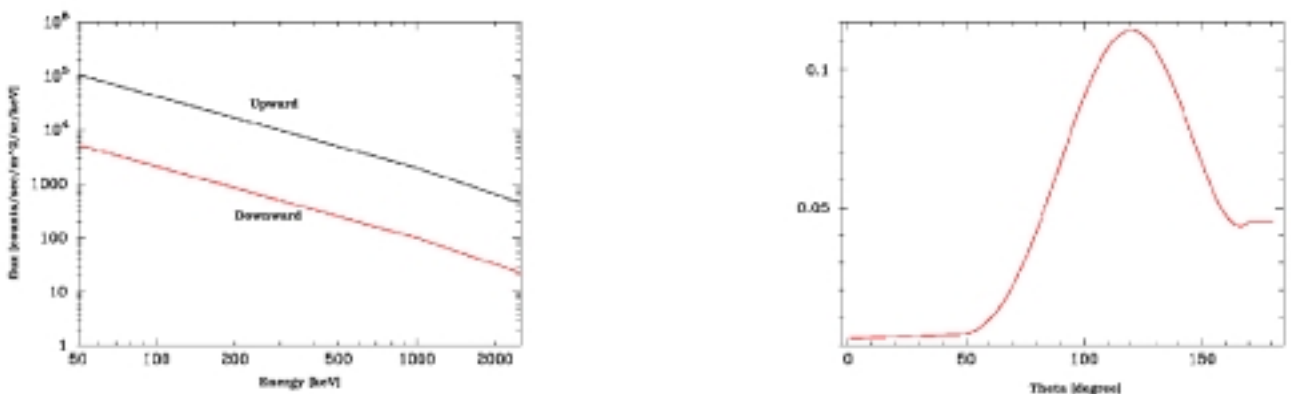


図 2.7: 2次成分のスペクトル(左)と、天頂を 0° とした角度分布(右)

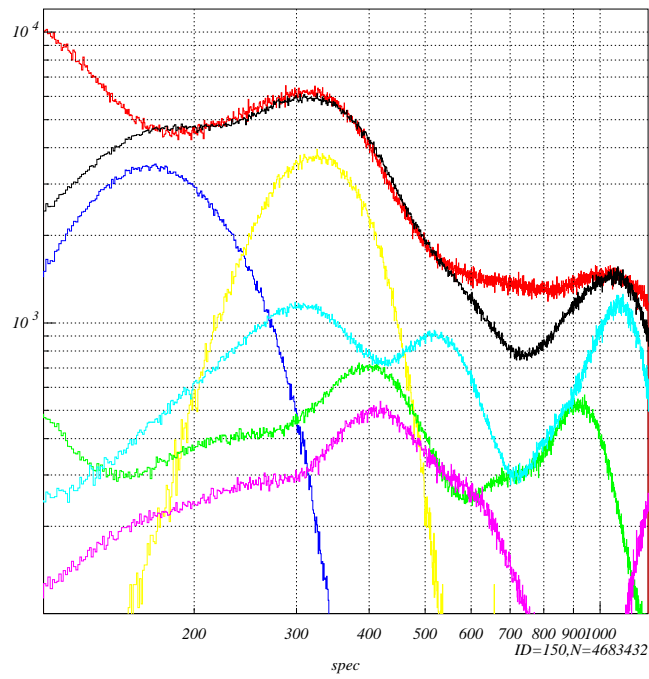


図 2.8: Anti 検出器のスペクトルのモデルとデータ
横軸:keV、縦軸:count/day

2.3 本論文の目的

H X D-Anti 検出器の性能があれば BATSE の LAD と同じように全方位観測を行ないトランジェント天体をモニターできると期待されている。本研究では BATSE で観測された天体に時間変化による地食の効果、衛星の姿勢、バックグラウンドの影響を組み合わせた HXD-Anti 検出器の観測シミュレーターを構築し、Anti 検出器の検出感度を推定することを目的としている。

第3章 観測シミュレーターの構築

3.1 シミュレーターの概要

使用したシミュレーターは

1. 天体からの光子を発生させるプログラム
2. バックグラウンドを発生させるプログラム
3. (1) や (2) の結果を入力する検出器のシミュレーター

を組み合わせたもので、(1)(2) は地食効果や検出器座標への座標変換を含んでいる。(3) には Geant4 を使い、(1) と (2) も C++ で作成した。

3.2 座標系

プログラム中で使用される位置や方向はそれぞれ異なった座標系であることが多く、作業に応じて座標変換がなされている。

天体の方向は経度の原点を春分点に向けた座標系である赤経赤緯で入力される(銀河座標でも可能)。衛星の位置は緯度の 0° を北極に、南極を 180° にした地球座標で表される。また、検出器のシミュレーションでは観測方向を Z 軸正の向きとした検出器座標が用いられる。表に本文中で用いる座標系を示す。

また、衛星の姿勢にはオイラー角 (α , β , γ) が用いられている。衛星の視野 (Z 方向) を天の北極に、太陽パドル (y 方向) を春分点に向けた状態を基本にして、まず Z 軸周りに α° 反時計周りに回転、次に新しい Y 軸周りに β° 反時計周りに回転、最後に新しい Z 軸周りに γ° 反時計周りに回転させる。

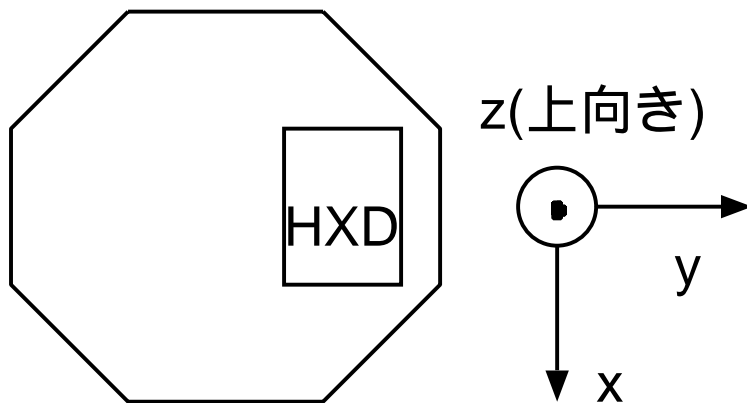


図 3.1: HXD は Astro-E2 の片側に寄っていて、そちらを Y 軸にとる

	x	y	z
x'	-sin sin +cos cos cos	cos sin +cos cos cos	-sin cos
y'	-sin cos -cos cos sin	cos cos -cos sin sin	sin sin
z'	sin cos	sin sin	cos

図 3.2: (x,y,z) から (x',y',z') へのオイラー角による座標変換の方向余弦

表 3.1: 使用した主な座標系

名前	軸 1	軸 2	軸 3	用いる用途
赤経赤緯	[0:360] 経度 原点は春分点 反時計周り	[-90:90] 緯度 原点は赤道で 北極を 90 °	— —	日時で変化せず常に 同じ方向を示すため 天体の方向などに用 いられる
銀河系座標	l [0:360] 経度 原点は銀河中心方向 反時計周り	b [-90:90] 緯度 原点は銀河面 北側に+にとる	— —	主に近くの天体の 方向に用いられる
地球座標	[0:360] 経度 原点は東経西経 0 ° 反時計周り	θ_m [0:180] 緯度 原点は北極点 南極点を 180 °	— —	地球上のどの位置かを 示すもので、衛星の位 置に用いている
検出器座標	z 検出器の向いている 方向にプラス	y 衛星の太陽パドル の方向にプラス	x y 、 z に 垂直方向	検出器座標は検出器の シミュレーターに使わ れる原点が検出器の座標
検出器座標 2	z 地表から垂直に 上向きにプラス	y 衛星の太陽パドル の方向にプラス	x y 、 z に 垂直方向	バックグラウンドの 発生に使われる座標で 原点は検出器

3.3 衛星の位置

地食効果を再現することが目的であるため、プログラムは観測期間を入力することで一秒間ごとのシミュレーションの繰り返すようになっている。つまり一秒ごとの衛星の位置データがあって、時間を入力するとその時間の衛星の位置が自動的に使用される。ここでは、Asca 衛星の軌道パラメータを用いて計算している。

3.4 天体のシミュレーション

以下では天体から検出器に入射する光子をシミュレートするプログラム (3.1 での (1) のこと) について述べる。このプログラムの概要は図 3.3 のようになっている。



図 3.3: 天体のシミュレーションプログラムの流れ

3.4.1 シミュレーションに用いる天体

今回のシミュレーションでは BATSE で観測されたものの中で明るいものを 32 種類選び出して使用した。

表 3.2: シミュレーションに用いた天体

No	Name	RA	DEC	flux (/cm ² /s/keV)	No	Name	RA	DEC	flux (/cm ² /s/keV)
1	1E1740-29	265.98	-29.72	7.649	17	GX1+4	263.01	-24.75	1.286
2	3C273	187.28	2.05	1.783	18	GX301-2	186.66	62.77	2.253
3	4U1543-45	236.79	-47.67	1.787	19	GX312-1	215.30	-62.70	1.249
4	4U1608-522	243.18	-52.42	3.324	20	GX399-4	255.71	48.79	1.397
5	4U1700-37	255.99	-37.84	4.249	21	GX354+0	263.00	33.84	2.217
6	AQUILAX-1	287.82	0.58	2.449	22	HERX-1	254.46	35.34	1.477
7	CENA	201.47	-42.97	6.373	23	HR1099	54.20	0.59	1.768
8	CIR X-1	230.17	-57.17	2.231	24	NGC1275	49.95	41.51	1.470
9	CRAB	83.63	22.01	5.562	25	NGC4151	182.60	39.51	2.453
10	CYGX-1	299.59	35.20	6.190	26	NOVASAG	272.74	-32.22	1.965
11	CYGX-3	308.11	40.96	1.395	27	OAO1657-415	255.20	-41.67	1.005
12	EXO1846-31	282.30	-3.10	2.333	28	PSR1259-63	195.70	-63.84	1.170
13	GROJ0422+32	65.43	32.91	6.894	29	PSR1509-58	228.48	-59.14	2.040
14	GRS0834-430	129.16	-43.26	2.296	30	SCOX-1	244.98	-15.64	6.487
15	GRS1009-45	153.40	-45.08	2.015	31	SCTX-1	279.18	-7.58	2.614
16	GRS1915+105	288.82	10.97	3.202	32	VERAX-1	135.53	-40.55	2.251

実際のプログラムではこの No から 1 引いた数で ID されている。

3.4.2 地食の判定

時間 (衛星の位置) が入力されると、32 種類の天体それぞれについて地食しているか否かが確認され、地食している場合はその後のシミュレーションから外される (地食している天体からの光は届かない)。この判定には atFunction ライブラリを使用した。

天体からの光子の数は当然だが天体ごとに違っている。発生させるフォトンがどの天体からのものかを決定するための乱数は、各天体の photonflux を足し合わせ、その中で一様乱数をとることで作っている。図 3.4 は横幅が photonflux を示し、天体 32 種類の photonflux を足し合わせたイメージ。このグラフに対して一様乱数をとると、各天体は photonflux に比例した比率で選ばれる。

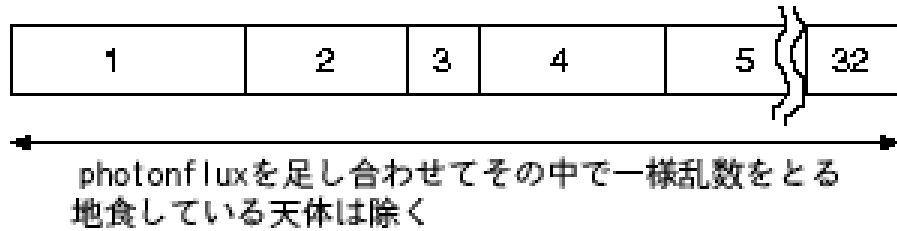


図 3.4: flux を使った乱数の発生

3.4.4 光子のエネルギー

光子を出す天体が決まったら次はエネルギーの決定が行なわれる。天体の光の数のエネルギーごとの分布は power-law $E^{-\alpha}$ のスペクトルを仮定し、その index は今回のシミュレーターでは簡単のため全ての天体で $\alpha = 2$ としている。エネルギーの選びかたは、スペクトルを観測するエネルギー範囲内で積分し、図 3.5 のように一様乱数を発生させてそれに対応するエネルギーをとるようにしている。

つまり、分布 $f(x)$ の乱数を発生させるときには一様乱数 y_i に対して、

$$y_i = \int_0^{x_i} f(x) dx$$

を満たす x_i を選ぶと、 x_i の頻度分布は $f(x)$ に従う。

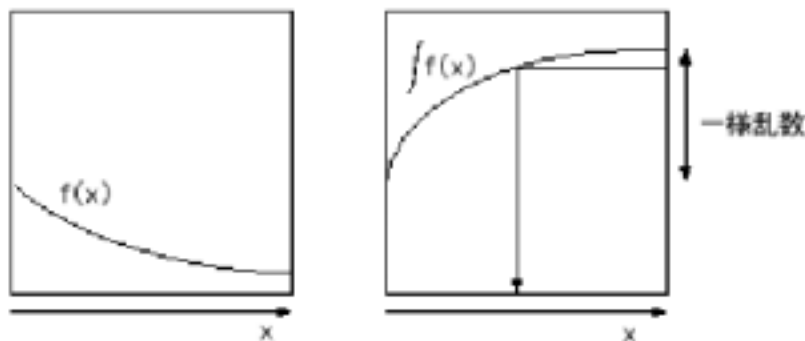


図 3.5: 分布 $f(x)$ の乱数の発生方法

3.4.5 光子の発射位置と方向

光子を出す天体の方向を使って、検出器のシミュレーターに入力する光子の発射位置と方向を決定する。

まず検出器を原点とし、検出器を完全に含める大きさの円盤 (今回のシミュレーターでは半径 30cm) を考える。この円盤を天体の方向 (検出器座標) 距離 50cm の位置に置き、さらに円盤の法線ベクトル (原点とは逆向きのもの) が天体の方向を向くように原点のまわりに円盤を回転させ、そして円盤内でランダムに点をとる。この点の位置を光子の発射位置とし、発射方向は検出器側へ円盤に垂直にとる。

3.4.6 発生させる粒子の数

地食効果のため 1 秒辺りに来る光子の数は変化する。この数は地食していない天体のスペクトル $[/cm^2/s/keV]$ をエネルギーで積分して得られる。

3.5 バックグラウンドのシミュレーション

以下では primary と secondary のガンマ線バックグラウンドを発生させるプログラムについて述べる。

3.5.1 衛星の位置によるスペクトルの変化

ガンマ線バックグラウンドのうち secondary は地磁気の影響を強く受けるため、衛星の位置、特に緯度によって flux が変化する。以下の内容は??を参考にしている。

地磁気の影響で一定以下のエネルギーの粒子は軌道を曲げられて検出器まで届かない。このエネルギー「Cut Off Rigidity」は緯度に大きく依存し、式 (3.1) のように表される。

$$E_{COR}[GV] = 14.9 \times (1 + h/R)^{-2} (\cos \theta_m)^4 \quad (3.1)$$

h : 地表からの高度

R : 地球の半径

θ_m 地磁気に対する緯度 [rad]

地磁気による secondary への影響は

$$GeoMagCut(E, E_{COR}) = flux(E) \times \left(\frac{E_{COR}}{4.7[GV]}\right)^{-0.7}$$

とした。

バックグラウンドの場合も円盤 (半径 30cm) を距離 50cm の位置に考える。円盤の位置は検出器座標 2 の Z 軸からの角度に依存した乱数を使って決める。そして円盤内からランダムに位置を選び、円盤から検出器方向に垂直にとる。プログラムのながれは下図のようになる。

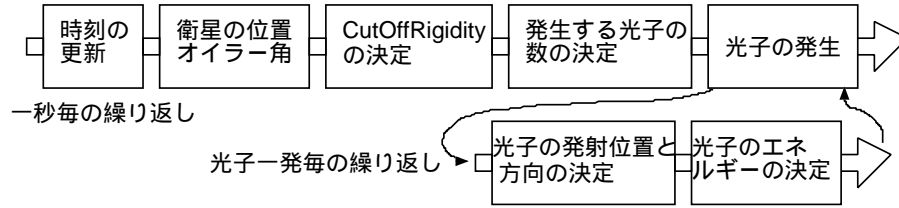


図 3.6: バックグラウンドのシミュレーションプログラムの流れ

3.5.3 換算時間

3.5.1 で述べたように衛星の位置が変われば検出器まで届くことのできる最低エネルギーが変化する。つまり、衛星の位置によって一秒あたりに観測される光子の数は変化する。そのため CutOffRigidity を使って secondary の flux を一秒毎に調整している。

3.6 検出器シミュレーター

検出器のシミュレーターには、放射線と物質の相互作用をシミュレートする C++ によるプログラム、Geant4 を使用した。検出器のジオメトリなどについては大野修論を参照。

第4章 感度計算

まず、第3章で述べたシミュレーションのうち光子発生の部分の手順を具体的に § 4.1 と § 4.2 に示し、次に § 4.3 以降でかに星雲 Crab についてのシミュレーションを行なって感度計算を行なう。

4.1 Crab をシミュレートするプログラム

1. まず、シミュレートを開始する時間を指定する (年, 月, 日, 時, 分, 秒, ミリ秒)。この時間は atFunction ライブラリによって mjd(modified julian date) という時間に変換される。
2. mjd に 1 秒加える。
3. atFunction ライブラリで mjd に対応する衛星の位置を軌道データから引き出す。
4. 衛星の位置と天体の方向に atFunction ライブラリを用いることで地食の判定を行なう。
5. mjd と 4. の結果を出力する。
6. 地食していないときは 7. に、しているときは 15. に進む。
7. $i=0$ とする
8. i に 1 加える
9. 光子のエネルギーを § 3.4.4 の方法で決める。
10. $r[0:30]$ と $theta_m[0:360]$ に一様乱数を振り、円盤内の位置
 $x = r * \cos(theta)$
 $y = r * \sin(theta)$
 $z = 50$
を得る。
11. Crab の方向を使って 10. の座標をを天体方向に座標変換して、光子の発生位置とする。
12. ベクトル (0,0,-1) を 11. と同じ座標変換して光子の運動方向とする。
13. mjd と 9.、 11.、 12. の結果を出力する。
14. i が天体の $totalFlux[1/s/cm^2]$ に円盤の面積を掛けたものより小さいときは 8. に、大きいときは 15. に進む。
15. mjd が観測期間内なら 2. に進み、そうでなければ終了

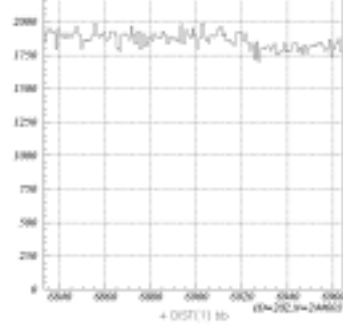


図 4.1: 地食のシミュレーションの例。
横軸は時間 (秒)、縦軸はカウントレート (count/s)。t=6922 秒で地食。

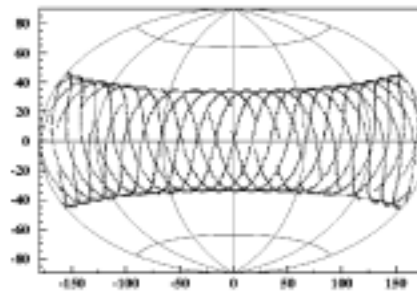


図 4.2: 衛星の動き。

4.2 バックグラウンドのプログラム

以下に primary と secondary のバックグラウンドの発生手順を述べる。

1. まず天体をシミュレートするプログラムと同じく開始時間を入力して mjd に変換する。
2. mjd に 1 秒加える
3. atFunction ライブラリで mjd に対応する衛星の位置を引き出す。
4. 3. の結果を XYZ 座標から地球座標に座標変換
5. 4. の結果と atFunction ライブラリを使って CutOffRigidity を出す。
6. CutOffRigidity を使ってバックグラウンドのスペクトルと totalFlux[$/s/cm^2/sr$] を出す。
7. totalFlux を方位角と円盤の面積で積分し換算時間を得る。
8. $i=0$ とする
9. i に 1 加える
10. 6. のスペクトルから § 3.4.4 の方法でエネルギーを決定
11. Crab のときと同じ方法で Z 軸プラス方向 50cm の位置にある円盤内に点をとる
12. 11. の座標を Z 軸からの角度に応じた乱数を使って原点周りに座標変換して光の発生位置とする
13. 12. をさらに衛星の姿勢を示すオイラー角で座標変換する
14. ベクトル (0,0,-1) に 12.、 13. の座標変換をして光子の運動方向とする
15. mjd と 10.、 13.、 14. の結果を出力する。
16. i が 7. の換算時間より小さいときは 9. に、大きいときは 17. に進む
17. mjd が観測期間内なら 2. に戻り、そうでなければ終了

放射化バックグラウンドシミュレーションは大野卒論の結果を使用。

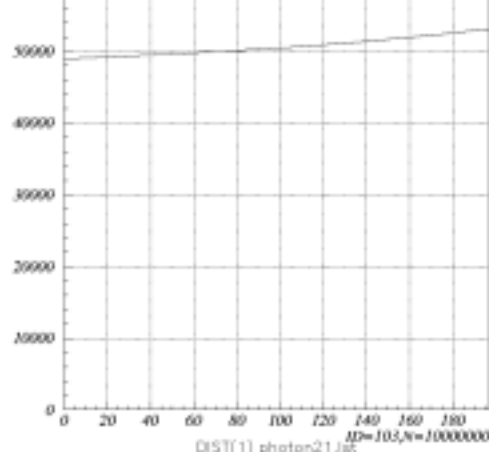


図 4.3: 時間 (衛星の位置) 変化によるバックグラウンドのカウントレート変化の例。縦軸は衛星に入射するバックグラウンドのカウントレート (count/s)。横軸は時間 (秒)。

4.3 感度計算

X 線天体観測の感度の基準にはしばしばかに星雲 Crab が用いられている。そこで Crab のカウントをもとに感度の計算をする。

4.3.1 感度の式

感度は、天体の光子のカウント数とバックグラウンドの誤差を比べたもの。そこでまず、バックグラウンドのシミュレーターで得られたカウント数から、確実に観測できるカウント数を計算する。

S:天体からの光子数 [count]

B:バックグラウンドのカウント [count]

として感度 5σ の天体の明るさ S は以下の式により求められる。

$$S - 5\sqrt{S} \geq 5\sqrt{B} \quad (4.1)$$

この式にバックグラウンドのカウント数を代入して計算すると感度 5σ のときの $S_{5\sigma}$ が得られる。そして Crab との比、

$$S_{5\sigma}/S_{Crab} \quad (4.2)$$

を最終的に求める。これを観測するエネルギー領域で計算する。ここでは 50keV-300keV とした。

ここではHXDのAnti一面での観測をシミュレートする。衛星は1日に1個の割合で全天の天体を観測するようにオイラー角が変化する。そのためAnti一面に対してCrabは毎日見える方向が変わる。そのため、CrabからのX線のカウントレートは入射方向により毎日変化する。今回は実際にASCA衛星が1993年5月～10月にとったオイラー角を用いて、Crabのカウントレートをそれぞれのオイラー角について計算し、その頻度分布を求めた(図4.3)。CrabがAnti検出器の正面にきたときに80[count/s]ほどになる。この平均を求めたところ23[count/s]となったので、これを $1S_{Crab}$ とした。

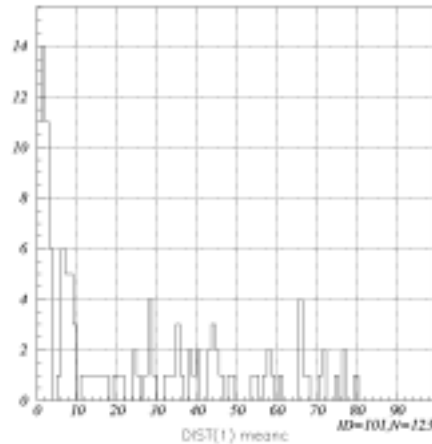


図 4.4: オイラー角を変えてシミュレートしたCrabのカウントの頻度分布
横軸はカウントレート

4.3.3 Crabの感度

シミュレーターの結果から、バックグラウンドはprimaryとsecondaryが1800[count/s]、放射化バックグラウンドが4000[count/s]で合計約5800[count/s]、この値を上で式で観測時間を変えながら計算した結果は下のようになった。

	地食1回		1日		1週間		1年	
有効時間	10秒	30秒	200秒	600秒	1400秒	4200秒	73000秒	219000秒
$S_{5\sigma}$	139.1	77.56	28.82	16.37	10.61	6.066	1.432	0.8234
$S_{5\sigma}/S_{Crab}$	6.076	3.389	1.259	0.7154	0.4637	0.2650	6.255×10^{-2}	3.598×10^{-2}

この4種類の期間はそれぞれ、1回の地食で10秒もしくは30秒、地食20回(地食が1日に約20回起こるため)、一週間、一年間となっている。

この感度とCrabのfluxの積を表(3.2)の各天体のfluxと比べることで、1日で1つ、あるいは5つ、1週間ですべて9個、あるいは25個、1年で32個全ての天体を観測できることがわかった。

ただし、バックグラウンドにはどうしても系統誤差があるため、観測時間を長くしても感度には限界があり1年の場合は上の計算のようにはならないだろう。また今回は天体のスペクトルのphoton indexを2として全て計算しているが、実際にはそうではない。さらにHXDのまわりにある衛星の構体、様々な機器のためのエネルギーの吸収を考慮していない。大野修論によれば、これらを考慮したときは天体のカウントレートは75%になることが示されているため、実際の感度は上の計算よりも少し悪いと思われる。

第5章 まとめ

既存のデータを元に、HXD-Anti 検出器による全方位観測のシミュレーターを組み立てて感度計算を行なった。これにより、長期間観測を続けることで全方位観測を行なえることを確認した。今後の課題としては、シミュレーターの観測エネルギー範囲を変えたり、シミュレーターをより正確に強化していくことなどがあげられる。

謝辞

本研究を行なうにあたり、全面的に御指導して下さった深沢先生、大杉先生に深く感謝致します。また、シミュレーション方法について多くの助言をくださった大野さんに感謝いたします。そして、様々な面でバックアップしてくださった研究室の皆様にお礼申し上げます。また、事務の面においてお世話になった上原さんに感謝致します。

参考文献

- [1] 川添 哲志 修士論文 (広島大学) 2003
- [2] 大野 雅功 卒業論文 (広島大学) 2002
- [3] J. C. LING , WM . A. WHEATON , P. WALLYN , R. T. SKELTON , WM . A. MAHONEY , R. G. RADOCHINSKI , J. L. CALLAS ,N. F. LING , AND E. TUMER R. SHUBERT 2000, APJS 127, 79