

2016年度 修士論文

Suzaku/WAMによる硬X線フレアにおける
11年太陽活動周期の観測

埼玉大学大学院理工学研究科 博士前期課程
物理機能系専攻 物理学コース
田代・寺田宇宙物理実験研究室

矢部聖也

指導教官 田代信 教授

2017/02/06

Abstract

地球に最も近い恒星である太陽は表面を詳細に観測が可能なることから、宇宙の基本構成要素である恒星の理解に大きく貢献してきた。太陽は近世より天文学者たちによる観測が行われており、約 400 年間の黒点観測の結果、11 年の活動周期があることが知られている。また、太陽表面で発生するフレア、ジェット等の物理現象は、恒星以外の中性子星、銀河核といった様々な天体でも発生しており、これらの現象の理解にも繋がる。本研究では、その中でも太陽フレアの硬 X 線放射に着目し研究を行った。

太陽フレアとは、外層大気での磁気リコネクションにより、磁気エネルギーが、粒子を加速させる運動エネルギーやプラズマを加熱する熱エネルギーなどに変換される過程であり、発生エネルギー量が 10^{29} – 10^{32} erg にもなる太陽系最大の爆発現象である。太陽フレアは多波長にわたって長年観測されており、これまでに様々な研究成果が報告されている。Dennis and Zarro (1993) らは軟 X 線強度と硬 X 線 (26-52 keV) エネルギーの間に正の相関があることを報告した (Neupert effect)。これは硬 X 線放射によってプラズマが加熱され軟 X 線放射が発生すると解釈される。Masuda et al. (1994) では「ようこう」の観測から軟 X 線放射源であるプラズマループの足元と頂上部に硬 X 線源を発見し、リコネクションによる粒子加速の証拠を報告した。また、Grigis and benz (2004,2005b) らにより、硬 X 線フレアの flux と光子指数には冪乗型の関係があり、光子指数はフレアのピークごとに Soft-hard-soft (SHS) の時間変動をすることが報告され、フレアの非熱的放射のピークは粒子加速を反映していることが示唆されている。このように、非熱的な放射である硬 X 線放射は粒子加速を解明する鍵であるとされている。従来の X 線観測衛星が太陽の X 線放射に対し、熱的な放射を含む数 keV から 100 keV 程度の放射を扱っているのに対して、Suzaku/WAM (Wideband All-sky Monitor) は、100 - 5000 keV の硬 X 線帯域を広くカバーし、 2π sr の立体角と $400\text{ cm}^2@1\text{ MeV}$ の広い有効面積で太陽方向をモニター観測することで、様々な規模の太陽フレアのほぼ非熱的成分のみの放射を多数観測してきた。実際に、WAM では 2005 年の打ち上げ以降、2015 年までに硬 X 線帯域で 700 個以上の太陽フレアを検出している。

本研究では、WAM で検出された 2005 年から 2014 年のイベントを解析することで、11 年太陽活動周期のおよそ 1 サイクルに観測された 586 個のイベントの平均スペクトル解析結果をカタログとしてまとめた。非熱的成分のみを扱った 10 年間のイベントのカタログ化は初の試みである。また、長時間のイベントに対して時系列解析を行いスペクトルの時間変動を調べ、これらの解析から以下の結果が得られた。硬 X 線 fluence と軟 X 線 flux の間には冪乗型の関係があり、その指数は $0.459 (\pm 0.072)$ であった。これは熱的制動放射のモデルから予想される値と矛盾せず、WAM の帯域まで粒子が加速されプラズマを加熱していることを示唆する。また、2013 年 10 月 28 日に発生した X1.1 class のイベントの時系列解析の結果から、硬 X 線 flux とスペクトルの光子指数の間に指数 $-0.157 (\pm 0.030)$ のべき乗型の関係とピーク毎の SHS の振る舞いを観測し、粒子加速モデルによるフレアの hardening を示唆する結果を得た。本論文ではこれらの詳細な解析とその解釈について議論する。

目次

第 1 章	Introduction	6
1.1	太陽	6
1.1.1	内部構造	6
1.1.2	磁気構造	8
1.1.3	黒点活動とその周期	9
1.2	太陽フレア	10
1.2.1	観測の歴史	10
1.2.2	発生機構	12
1.3	太陽フレアの X 線放射	15
1.4	硬 X 線スペクトルの時間変動	18
1.4.1	Soft-hard-soft (SHS)	19
1.4.2	Soft-hard-hard (SHH)	20
1.5	本研究の目的	21
第 2 章	Instrument	22
2.1	X 線天文衛星「すざく」	22
2.2	広帯域全天モニター (Wide band All sky Monitor; WAM)	23
2.2.1	構造	23
2.2.2	信号処理	24
2.2.3	WAM のバックグラウンド	26
2.2.4	エネルギー応答関数	26
2.3	Geostationary Operational Environment Satellite (GOES)	28
2.3.1	宇宙環境モニター (Space Environment Monitor system; SEM)	28
第 3 章	Observation and Analysis	29
3.1	WAM による太陽フレアの観測	29
3.2	観測データ	29
3.3	バックグラウンド推定	30
3.4	イベントセレクション	31
3.5	スペクトル解析	31
3.5.1	平均スペクトル解析	32
3.5.2	時系列解析	32

第 4 章	Result and Discussion	33
4.1	解析結果	33
4.2	硬 X 線帯域と軟 X 線帯域の相関の検証	34
4.3	太陽活動周期と各パラメータの関係	36
4.4	硬 X 線帯域の特徴	37
4.5	硬 X 線スペクトルの時間変動	41
第 5 章	Conclusion	44
付 録 A	太陽フレアカタログ	45

目 次

1.1	太陽の構造	8
1.2	Ω 効果と浮上した磁束管により生成された黒点	8
1.3	1950 年から 2016 年までの黒点数の推移 (Ahluwalia & Ygbuhay 2016)	9
1.4	典型的なフレアにおける様々な波長での強度変動 (Kane 1974)	11
1.5	太陽観測衛星の歴史	12
1.6	磁気リコネクションの概念図	13
1.7	1992/02/21 に観測された軟 X 線観測による映像 (Tsuneta et al. 1992)	14
1.8	CSHKP モデルの概念図 (Shibata et al. 1995)	14
1.9	「ようこう」によるフレアループ上の軟 X 線と硬 X 線の観測結果 (Masuda et al. 1994)	15
1.10	典型的なフレアのスペクトル (Hudson & Ryan 1995)	16
1.11	1980/03/27 のフレアの同時プロット (Dennis & Zarro 1993)	18
1.12	硬 X 線 flux と光子指数の時間変動 (Grigis & Benz 2004)	19
1.13	$I_{\text{ACC}} \times \tau$ と電子分布の関係 (Grigis & Benz 2006)	20
1.14	SHH フレアの硬 X 線と SEP の光子指数の関係 (Tripathi et al. 2013)	21
2.1	X 線天文衛星「すざく」 (Mitsuda et al. 2007)	22
2.2	HXD-WAM 概略図 (Yamaoka et al. 2009)	23
2.3	「すざく」内部構造 (Yamaoka et al. 2009)	23
2.4	WAM の有効面積 (Yamaoka et al. 2009)	24
2.5	WAM のセンサー部 (Yamaoka et al. 2009)	25
2.6	WAM の角度定義 (Ohno et al. 2005)	25
2.7	WAM のデータフロー (Yamaoka et al. 2009)	26
2.8	WAM のライトカーブ。(上から順に WAM0、WAM1、WAM2、WAM3)	27
2.9	他衛星との校正 (Yamaoka et al. 2009)	27
3.1	WAM による太陽フレア検出数の推移と黒点相対数の推移	30
3.2	2014/10/16 13:01:20 M4.3 class のスペクトル	32
3.3	power law モデルによるフィッティング	32
4.1	軟 X 線 flux と硬 X 線 flux の相関	35
4.2	軟 X 線 flux と T_{90} の相関	35
4.3	軟 X 線 flux と硬 X 線 fluence の相関	35
4.4	軟 X 線 flux のヒストグラム	36
4.5	硬 X 線 fluence のヒストグラム	36

4.6	硬 X 線 flux ヒストグラム	36
4.7	硬 X 線 T_{90} のヒストグラム	37
4.8	硬 X 線光子指数のヒストグラム	37
4.9	flux と光子指数	38
4.10	T_{90} と光子指数	38
4.11	光子指数ヒストグラムのガウシアンフィット結果	39
4.12	図 4.9 に図 4.11 から得られた中央値と $\pm 1\sigma$ の線を加えた	39
4.13	図 4.10 に図 4.11 から得られた中央値と $\pm 1\sigma$ の線を加えた	40
4.14	硬 X 線 flux ヒストグラム	40
4.15	継続時間のヒストグラム	41
4.16	2013/10/28 01:56:36 に発生したイベントの光度曲線と Hardness ratio	42
4.17	2013/10/28 01:56:36 に発生したフレアの光子指数の時間変動	42
4.18	1 秒毎に切り出したスペクトルから得られた各時間毎の flux と光子指数の相関	43

表 目 次

1.1	太陽フレアの分類 (Shibata & Magara 2011)	10
2.1	「すざく」主要諸元	23
2.2	WAM の基本特性 (Yamaoka et al. 2009)	24
2.3	WAM のエネルギーチャンネル	25
2.4	WAM のデータ	25
2.5	軟 X 線強度と GOES class	28
3.1	WAM による太陽フレアの検出数	29
4.1	軟 X 線帯域と硬 X 線帯域の関係	34
4.2	光子指数の分類	37
A.1	Solar flare catalog by broken power law fit	46
A.2	Solar flare catalog by power law fit	48

第1章 Introduction

古来から人は空に輝く星々に、崇拜、神格化といった特別な意味を見出していた。その中でも、地球上の全生命のエネルギーの源である太陽は、世界各地の神話から伝わるように、我々にとってひととき特別な星であった。しかし、物理学、天文学が発展し、特別な星であった太陽は宇宙に最もありふれた星である恒星の一つであることが現在では知られている。

太陽は我々に最も近い恒星である。その距離は約 1.6×10^{-5} 光年であり、次に近い恒星であるケンタウルス座 α 星が、約 4.2 光年の距離であることからその特筆すべき近さが理解できる。この比類無き近さのおかげで、太陽は地上と宇宙から様々な観測装置を用いて詳細に観測することが可能である。太陽を詳しく調べることは宇宙に数多ある恒星の一般的性質を調べることに繋がる。さらに、太陽表面で発生する爆発現象は、宇宙でしばしばみられる磁場によるエネルギー解放で起きている現象の解明にも繋がるとされている。このように、太陽研究は太陽物理学のみならず、宇宙物理学、天文学など多岐にわたり研究意義を持つテーマである。本研究では、太陽系最大の爆発現象である太陽フレアの 10 年間の解析結果を報告する。

1.1 太陽

初めに太陽フレアの舞台である太陽の構造について説明する。

1.1.1 内部構造

中心核

太陽のエネルギー源となる約 0.2 太陽半径の核融合反応領域が中心核である。この領域で発生する核融合反応を pp チェインという。この反応には三段階の分岐があり、それぞれ、pp-I、pp-II、pp-III と呼ばれる。太陽の主なエネルギー源を担うのが pp-I である。pp-I では、水素原子核である陽子が重水素となり、重水素がさらに陽子と結合することで He^3 が生成され、同様に作られた He^3 と結合することで、 ^4He 原子核を生成する。このように生成された原子核が別の原子核と反応することで核融合は進み、pp-II では ^7Be 、 ^7Li 、 ^4He 、pp-III では、 ^8B 、 ^8Be 、 ^4He がそれぞれ生成される。pp-I と pp-II の分岐比は 85:15、pp-II と pp-III の分岐比は 13:0.015 とされている。また、それぞれの反応では同時にニュートリノも放出しており、この太陽ニュートリノの検出は核融合反応の証明として重要な役割を果たしてきた。

放射層、対流層

太陽は中心から表面にかけて温度が低くなっていく。そのため中心核で生成された熱エネルギーは数十万年かけて太陽表面へと伝達する。伝達手段としては放射と対流があり、どちらで伝わるかは温度勾配によって決まる。温度勾配が緩やかなところでは放射、急なところでは対流で伝わる。これらの領域をそれぞれ放射層、対流層と呼び、 ρ を密度、 γ を断熱指数、 p を圧力、 r を半径とすると、以下の式を満たす場合を対流層、満たさない場合を放射層という。

$$d \ln \rho / dr - \gamma^{-1} d \ln p / dr > 0, \quad (1.1.1)$$

光球

光学的に薄くなり、地上から様々な波長の電磁波が観測可能になる領域を光球と呼ぶ。厚さは数 100 km と約 70 万 km の太陽半径に比べ薄く、その温度は約 6000 K であり、上空ほど温度は低くなる。また、後述する黒点の発生場所でもあり、強い磁場を持つ黒点付近ではエネルギー伝播が阻害され温度が低くなるため黒く見える。

彩層

光球の外側の厚さ数千 ~ 1 万 km の領域である彩層は、皆既日食時に $H\alpha$ 線、 $H\beta$ 線などで淡紅色に輝く。すなわち光学的に薄く温度にして 4700-5800 K の領域である。この彩層を調べるため、1940 年代から 70 年代にかけて皆既日食直後および終了直前の分光観測が行われた。また、彩層ではコロナから降り注ぐ非熱粒子や熱エネルギーにより、彩層が急激に加熱されコロナへと上昇する彩層蒸発という現象も発生する。

遷移層

遷移層とは後述するコロナと彩層の間の約 100 km の短い領域でありながら、2 桁温度が変わる急激な温度勾配となっている太陽大気層のことである。

コロナ

コロナとは光球の外側に存在する希薄なガスである。その温度は 100 万 K をこえ、その高温ゆえに太陽の主成分である水素原子はほぼ電子と陽子に電離している。光球の温度は約 6000 K なのに対し、コロナがなぜ 100 万 K 以上の高温なのかはいまだわかっておらず、太陽物理学上の大きな謎とされている。現在これを説明するための有力な仮説は 2 種類あり、1 つは乱流状態である光球で生じた波がコロナまで伝播し、波からプラズマへのエネルギー輸送で加熱される波動説であり、もう 1 つはフレアと比較し非常に小さな爆発現象がコロナで大量に発生し、これらのエネルギーにより加熱されるというマイクロフレア説である。

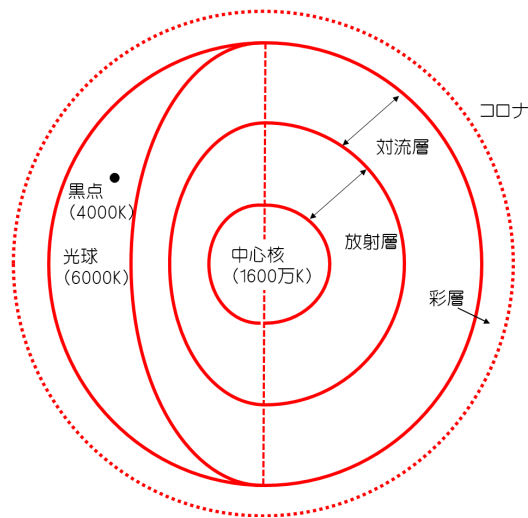


図 1.1: 太陽の構造

1.1.2 磁気構造

太陽表面は赤道付近の自転周期が約 26 日程度に対し、極付近が約 37 日程度と場所によって自転速度が異なる差動回転をしている。この観測に基づいて、太陽大気に見られる磁場の生成過程を説明したものが Ω ダイナモ効果である (Parker 1955)。太陽内部を極から極へと結ぶポロイダル磁場は、赤道付近のみ速く回転することからねじられトロイダル成分が生成される。これらのダイナモ過程によって生成され増幅された磁束管は太陽大気中で磁気浮力によって浮上する。このとき浮上した磁束管により、対流によるエネルギー伝搬が阻害され付近に比べて低温になる光球面での磁束管の切り口を黒点と呼ぶ (図 1.2)。

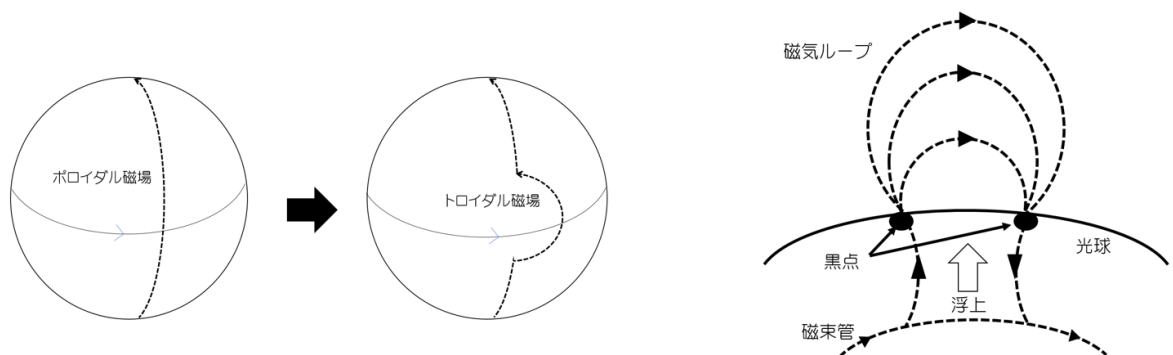


図 1.2: Ω 効果と浮上した磁束管により生成された黒点

1.1.3 黒点活動とその周期

黒点観測の歴史は古く、Galileo Galilei による 1610 年の発見以降、400 年間にわたり天文学者たちにより観測が続けられている。Heinrich Schwabe (1843) は、当時水星の内側に存在するとされていた惑星 Vulcan の影を光球面に発見するため 17 年間にわたり太陽を観測し続け、新惑星は発見できなかったものの黒点の数に周期的な増減があることを発見した。この発見に注目した Rudolf Wolf は、黒点数の数量化の方法として以下の式を考案した。

$$R = k(10g + s) \quad (1.1.2)$$

ここで、 R は相対黒点数、 k は Wolf の観測機器である口径 7.5 cm×64 の望遠鏡の識別能を $k = 1$ とする観測係数、 g は黒点群の数、 s は個々の黒点数であり、 R の値が大きいほど太陽活動は活発であるとみなす。Wolf はこの式を用いて自らの観測結果のほかに、1610 年の観測まで黒点相対数を求め、11.1 年という太陽活動周期を発見した (Wolf 1850)。この数量化方式による周期は太陽フレアの発生率や電磁波の放射量ともよく相関しており、現在でも太陽活動の目安として使用されている。また、彼の功績をたたえて Wolf 黒点相対数と呼ばれている。

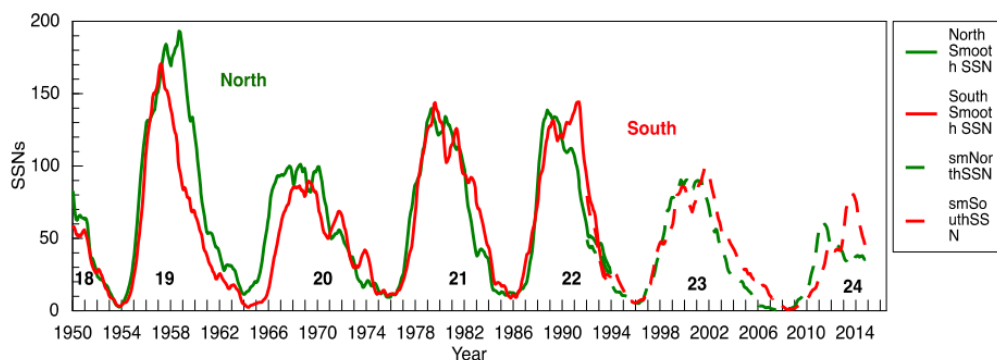


図 1.3: 1950 年から 2016 年までの黒点数の推移 (Ahluwalia & Ygbuhay 2016)

黒点相対数がそれぞれ極大、極小になる時期を太陽極大期、極小期とし、個々の活動周期は極小期から極小期までで定義される。それぞれの活動周期の名は、Wolf の付番規則により、1755 年から 1766 年の周期を伝統的に”Solar cycle 1”とし、それ以前の周期は、”Solar cycle 0 ”、”Solar flare cycle -1”と名付けられている (Kane 2002)。 (Galileo が最初に黒点を発見した 1610 年は”Solar cycle -12”であり、現在 (2017) は”Solar cycle 24”。) 黒点と太陽活動周期の研究は Wolf 以後も続き、20 世紀初頭には黒点が磁化されている等の物理的基礎が明らかになり (Hale 1908)、1919 年には周期が変わる際に磁極が逆転するなどの特徴が報告された (Hale et al. 1919)。400 年の観測の平均周期は約 11 年であるものの、短い周期は 9 年、長い周期は 14 年と周期毎のばらつきも存在する。

1.2 太陽フレア

太陽フレアとは、外層大気において発生する磁気リコネクションにより、磁気エネルギーが、プラズマを加熱する熱エネルギーや、加速させる運動エネルギーなどに変換される過程であり、その発生エネルギー量は $10^{29} - 10^{32}$ erg にもなる太陽系最大の爆発現象である (Shibata & Magara 2011)。フレアは主に黒点群の中で発生し、その発生頻度は太陽活動周期に大きく依存する。フレアは発生後、数分から数時間にわたり様々な波長帯で増光する (図 1.3)。発生初期の継続時間の短い鋭いピークを持つパルスをインパルス相と呼び、その後のゆるやかな増光をグラデュアル相と呼ぶ。エネルギーの高い加速成分の寄与が大きい硬 X 線やマイクロ波などでインパルス相での増光が見られ、熱的成分の寄与が大きい軟 X 線、 $H\alpha$ 線などではグラデュアル相での増光が確認される。また、その継続時間によって表のように分類される。

表 1.1: 太陽フレアの分類 (Shibata & Magara 2011)

	size (L)(10^{14} km)	time scale (t)(s)	energy (erg)
マイクロフレア	0.5 – 4	60 – 600	$10^{26} - 10^{29}$
インパルス相フレア	1 – 10	$60 - 3 \times 10^3$	$10^{29} - 10^{32}$
LDE フレア	10 – 40	$3 \times 10^3 - 10^5$	$10^{30} - 10^{32}$
巨大アーケードフレア	30 – 100	$10^4 - 2 \times 10^5$	$10^{29} - 10^{32}$

1.2.1 観測の歴史

太陽フレアの最初の観測は白色光の増光現象として、第 10 太陽活動周期中の 1859 年 9 月 1 日に行われた (Carrington 1859)。その後、1930 年代に入ると彩層由来の水素 $H\alpha$ 輝線の観測が発展し、 $H\alpha$ 線によるフレアの観測が世界中で行われた。1942 年の軍用レーダー運用の際に偶然検出されたメートル波の電磁放射はコロナ内の非熱的電子の存在を明らかにした (Hey 1983)。1950 年代には気球とロケットを用いて硬 X 線 (≥ 10 keV) による太陽の観測が可能となり、1958 年にはフレア中の硬 X 線が初めて観測された (Peterson & Winckler 1959)。1970 年代以降は人工衛星やロケット等を用いて、宇宙空間から太陽フレアの観測が行われた。1980 年代には、*Solar Maximum Mission* (SMM, Bohlin et al. 1980) や、「ひのと」 (Kondo 1982; Tanaka 1983) といった太陽観測衛星によるフレアの観測が行われ、1990 年代には「ようこう」 (Ogawara et al. 1991)、*Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO, Domingo et al. 1995) により様々な研究成果が報告された。その後も *Transition Region and Coronal Explorer* (TRACE, Handy et al. 1999)、*Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI, Lin et al. 2002)、「ひので」 (Kosugi et al. 2007)、*Interface Region Imaging Spectrograph* (IRIS, De Pontieu et al. 2014) といった様々な太陽観測衛星による調査が行われている。

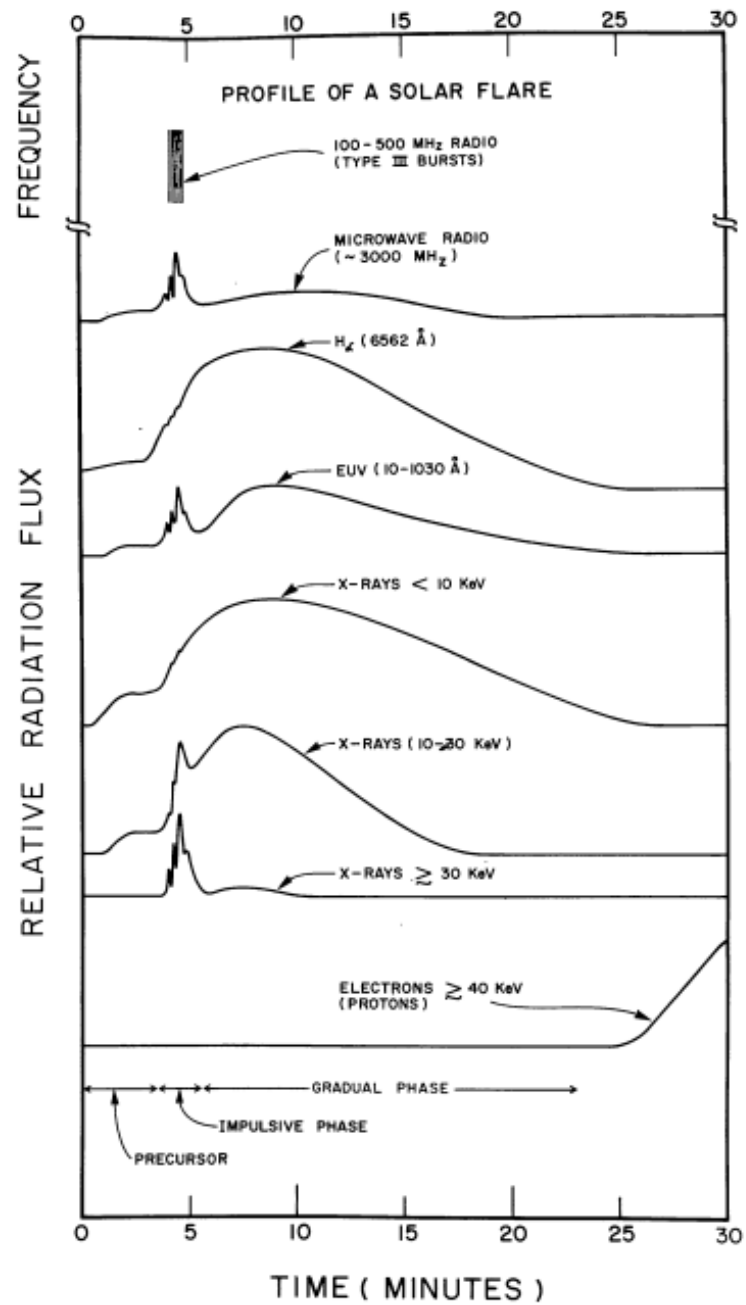


図 1.4: 典型的なフレアにおける様々な波長での強度変動 (Kane 1974)

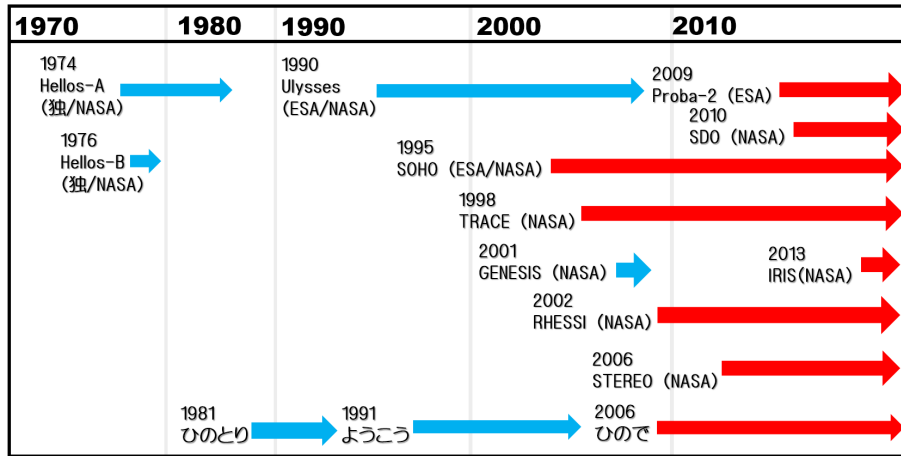


図 1.5: 太陽観測衛星の歴史

1.2.2 発生機構

磁気リコネクション

太陽フレアの発生機構とされているのが、磁気リコネクションである。逆向きの磁力線がプラズマ中で押し付けられると、電流が発生する。これを電流シートという。この電流シートが形成されてるときは反発力が働き磁力線はつなぎ変わらないが、なんらかの理由で消失すると反発力は消え磁力線が繋ぎ変わる。磁力線がつなぎ変わるときに発生するまがった磁力線の磁気張力により磁力線にトラップされたプラズマが加速されるジェットを形成する(図 1.6)。このときジュール加熱、衝撃波加熱により磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギー、熱エネルギーに変換されフレアのエネルギー源になるとされている。現在では広く受け入れられている磁気リコネクションモデルだが、1990 年代半ばまでは懐疑的な研究者も少なくなかった。

太陽フレアの原因が磁気エネルギーによると明らかになったときに最初に考案されたのが、単純な磁気拡散によるモデルであった。しかし、このモデルでは典型的なフレアの領域を考えたときに 10^{14} 秒かかることになり、実際の太陽フレアのタイムスケールを説明することができない。また、時間のつじつまが合うようにフレア領域を小さくした場合、発生エネルギーを説明することができないが、発生エネルギーから求めたフレア領域の大きさは観測結果と一致していたため、これらの矛盾を説明する必要があった。この矛盾を解決するために、プラズマを導入したリコネクションによるタイムスケールの短縮が考案された (Sweet 1958; Parker 1957) が、このモデルにより導出されたタイムスケールも 10^7 秒程度と依然説明がつかない。そこで、Petschek (1964) により、磁力線の繋がりが中心部の小さな拡散領域のみで発生し、エネルギー変換は外側のスローショックで行われるモデルが提案された。このモデルから導かれた Petschek の近似解は、

$$t_{\text{Petschek}} \simeq \frac{8}{\pi} \ln R_m t_A \simeq (10 - 100) \times t_A \quad (1.2.1)$$

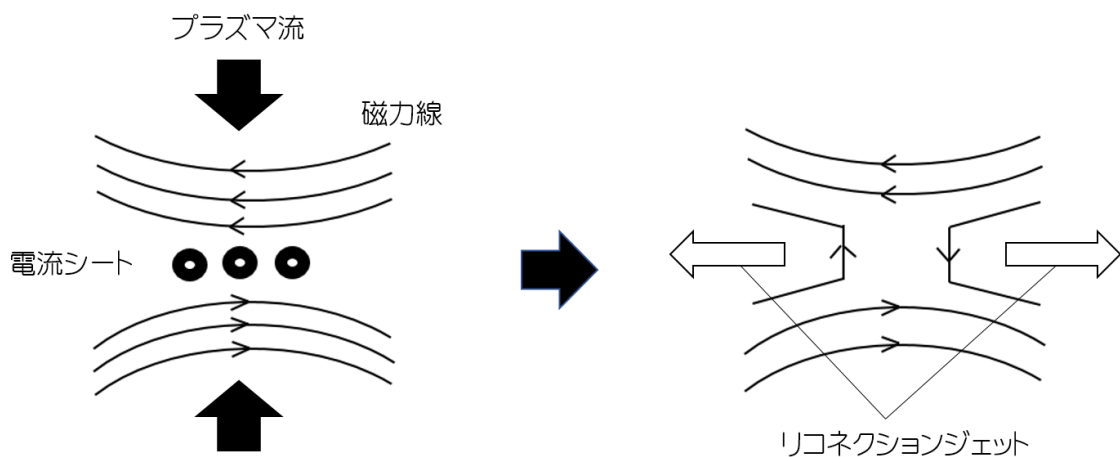


図 1.6: 磁気リコネクションの概念図

となる。ここで、 t_A はアルベーン時間、 R_m はレイノルズ数であり、 $t_A = 1 - 10$ s のため実際の観測結果のタイムスケールとよく一致する。この解を検証するために数値シミュレーションが行われており、Petchek 解は確かに存在することが示された (Ugai & Tsuda 1977; Sato 1979)。

「ようこう」による観測

太陽フレアの発生機構としての磁気リコネクション説を観測により実証したのが、我が国 2 番目の太陽観測衛星「ようこう」である。図 1.7 は 1992/02/21 の「ようこう」による太陽フレアの軟 X 線観測の結果である (Tsuneta et al. 1992)。LDE フレアの時間発展がよく観測されており、カスプ型形状が見かけ上大きくなっていること、外側ほど温度が高いことなどが確認された。これは CSHKP モデル (Carmichael 1964; Sturrock 1966; Hirayama 1974; Kopp & Pneuman 1976) で予言された通りの結果であり、LDE フレアにおける磁気リコネクションの証拠とされた。

1993 年には軟 X 線フレアループの足元とループ上空に硬 X 線源を持つインパルスフレアが報告された (Masuda et al. 1994)。これにより、エネルギー解放がループの上空で起きていることが判明し、磁気リコネクションが全ての太陽フレアで普遍的に発生していることが有力となった。その後の観測により、リコネクションジェットによってループの上空に放出される高温プラズマが続々と発見され (Shibata et al. 1995)、太陽フレアの発生機構としての磁気リコネクションがここに実証された。

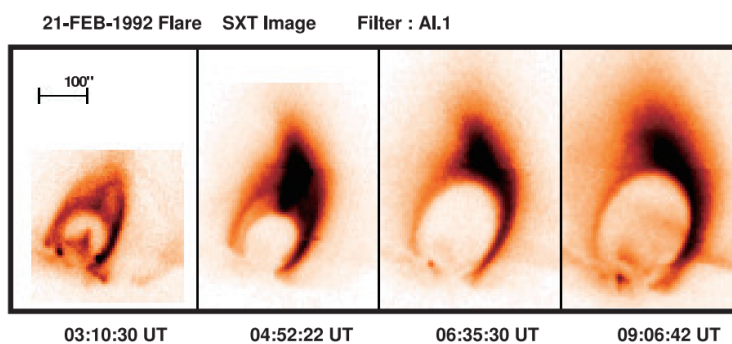


図 1.7: 1992/02/21 に観測された軟 X 線観測による映像 (Tsuneta et al. 1992)

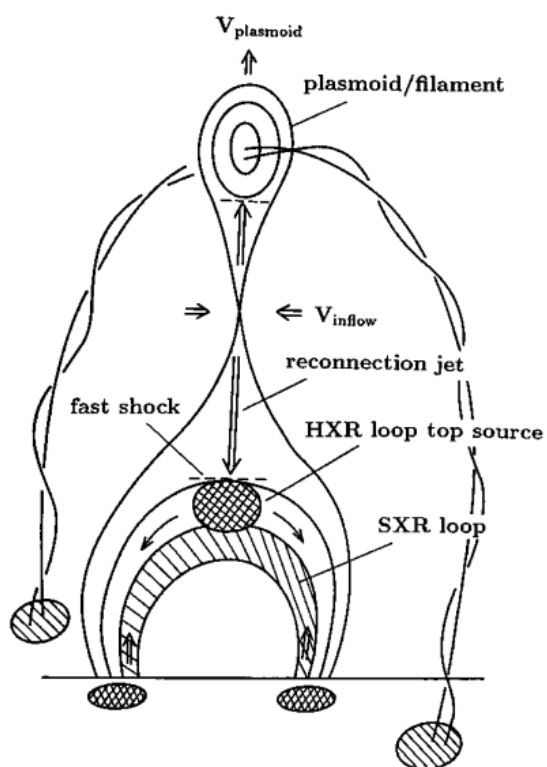


図 1.8: CSHKP モデルの概念図 (Shibata et al. 1995)

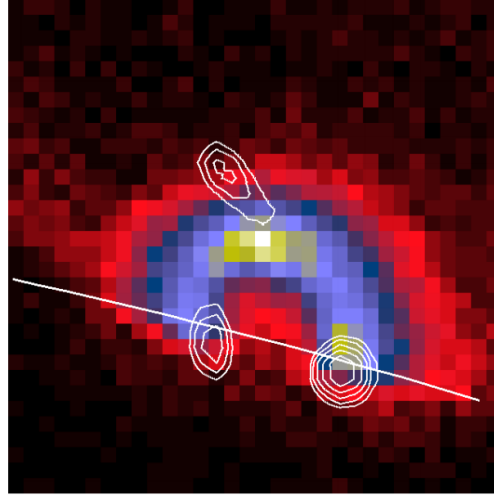


図 1.9: 「ようこう」によるフレアループ上の軟 X 線と硬 X 線の観測結果 (Masuda et al. 1994)

1.3 太陽フレアの X 線放射

太陽フレアでは磁気リコネクションによって高エネルギーまで加速された電子から非熱的制動放射によりフレアループの足元及び、ループ上空で硬 X 線が生成される。硬 X 線放射は加速粒子の振る舞いが直接反映されており、磁気エネルギーが粒子を加速する過程や加速のトリガーなど、未だに謎の多い加速機構を解明する手がかりとされている。太陽フレアによって生成された高温プラズマからは軟線 X が放射される。磁気リコネクションによって解放されたエネルギーは最終的にプラズマを加熱する熱エネルギーになるとされており、軟 X 線放射の計測は太陽フレアの規模を表す尺度として最適とされている。図 1.10 に X 線帯域の増えあのスペクトルを示す。以下では X 線放射の物理過程について説明する。

非熱的制動放射

Maxwell-Boltzmann 分布を持たない電子が加速され、周囲のイオンと衝突する制動放射の過程を非熱的制動放射と呼ぶ。この過程では、衝突されるイオンの密度により、厚い標的 (thick-target) モデルと、薄い標的 (thin-target) モデルが存在する (Brown 1971)。モデルの違いによって生成される硬 X 線のスペクトルは異なり、イオンに突入する直前の電子のスペクトルを、

$$F(E_0) = AE_0^{-\delta} \quad (\text{electrons/s/keV/cm}^2) \quad (1.3.1)$$

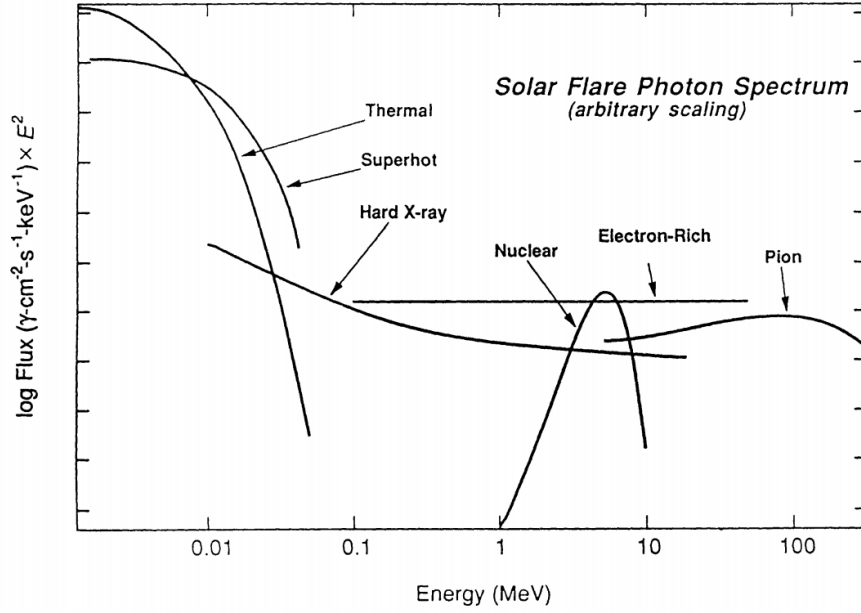


図 1.10: 典型的なフレアのスเปクトル (Hudson & Ryan 1995)

と仮定すると、厚い標的 (thick-target) では、スเปクトルは以下ようになる。

$$I_{\text{thick}}(\epsilon) = \frac{SA\kappa_{\text{BH}}Z^2}{4\pi R^2K} \frac{B(\delta - 2, \frac{1}{2})}{(\delta - 2)(\delta - 1)} \epsilon^{-\gamma} \quad (\text{photons/s/keV/cm}^2) \quad (1.3.2)$$

$$\gamma = \delta - 1 \quad (1.3.3)$$

$$\kappa_{\text{BH}} = \frac{8\alpha}{3} r_0^2 m_e c^2 \quad (1.3.4)$$

$$K = 2\pi e^4 \ln \Lambda \quad (1.3.5)$$

ここで、 S はフレアの面積、 Z はイオンの原子量、 $\ln \Lambda$ はクーロン対数、 R は天文単位で規格化された半径、 $B(p, q)$ はベータ関数を表す。以上より、生成されるスเปクトルの光子指数は加速される電子のべきより小さくなることがわかる。($\gamma < \delta$)

一方、薄い標的 (thin-target) では、以下ようになる。

$$I_{\text{thin}}(\epsilon) = \frac{SA\kappa_{\text{BH}}Z^2\Delta N}{4\pi R^2} \frac{B(\delta, \frac{1}{2})}{\delta} \epsilon^{-\gamma} \quad (\text{photons/s/keV/cm}^2) \quad (1.3.6)$$

$$\gamma = \delta + \frac{1}{2} \quad (1.3.7)$$

ここで、 ΔN はイベントソースの柱密度であり、生成された硬 X 線スเปクトルの光子指数は加速電子のべきより大きくなる ($\gamma > \delta$)。太陽フレアにおいては、ループの足元からの硬 X 線放射の光子指数がループ上空からの放射の光子指数より Hard であることが報告されており (Ishikawa et al. 2011)、ループ足元が Thick-target からの放射、ループ上空が Thin-target からの放射であるとされている。

熱的制動放射

熱平衡状態速度分布を持つプラズマからの制動放射を熱的制動放射と呼ぶ。熱平衡状態の速度分布は以下の Maxwell-Boltzmann 分布で与えられる

$$P(v) = \left(\frac{m_e}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-m_e v^2 / 2k_B T}. \quad (1.3.8)$$

制動放射では電子の運動エネルギーが電磁波として放射されるため、放射後の電子が自由状態であるためには以下の条件を満たす必要がある。

$$h\nu \geq \frac{1}{2} m_e v^2. \quad (1.3.9)$$

すなわち、観測される電磁波の周波数から電子の下限速度が以下のように決定される。

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2h\nu}{m_e}} \quad (1.3.10)$$

以上の制限に注意し、電子の速度分布について平均をとった熱的制動放射のスペクトルは以下のように表される。

$$\epsilon_v^{ff} = \frac{dW(T, \nu)}{d\nu dV dt} = 2\pi \frac{\int_{v_{\min}}^{\infty} v^2 dv e^{-m_e v^2 / 2k_B T} \frac{dW(v, \omega)}{d\omega dV dt}}{\int_0^{\infty} v^2 dv e^{-m_e v^2 / 2k_B T}} \quad (1.3.11)$$

$$= \frac{2^5 \pi e^6}{3mc^3} \left(\frac{2\pi}{3k_B m} \right)^{1/2} T^{-1/2} n_e^2 e^{-h\nu/k_B T} \tilde{g}_{ff}(T, \nu). \quad [\text{erg/cm}^3/\text{Hz}] \quad (1.3.12)$$

ここで、 $\tilde{g}_{ff}$ は電子の速度分布で平均した Gaunt 因子である。上記の式からわかる熱的制動放射のスペクトルの特徴を以下にまとめる。

- $h\nu > k_B T$ では急激に減少する。
- $h\nu \ll k_B T$ のとき、周波数によらず一定となる。
- 電子の密度の 2 乗と温度の $-\frac{1}{2}$ 乗に比例する

また、式 (1.3.12) を振動数で積分することにより、単位体積、単位時間あたりのエネルギー放出量が以下の式で表される。

$$\frac{dW(T)}{dV dt} = \int \epsilon_v^{ff} d\nu = 1.4 \times 10^{-27} T^{1/2} Z^2 n_e n_i \tilde{g}_{ff}(T) \quad [\text{erg/cm}^3/\text{s}] \quad (1.3.13)$$

ここで、プラズマが一様に分布していると考え、 l を視線方向の距離とし、 $dV = dS dl$ と書ける。Gaunt 因子はほぼ 1 なので (Nozawa et al. 1998)、熱的制動放射の単位時間、単位面積あたりのフラックスは以下のように書くことができ。温度の 0.5 乗とエミッションメジャー ($\int n_e^2 dl$) に比例することがわかる。

$$\frac{dW(T)}{dS dt} = 1.4 \times 10^{-27} T^{1/2} Z^2 \int n_e^2 dl \quad [\text{erg/cm}^2/\text{s}] \quad (1.3.14)$$

Neupert 効果

熱的放射である軟 X 線 (1–8 Å) flux と非熱的放射である電波 flux の間にはべき乗型の関係があることが報告されている (Neupert 1968)。また、軟 X 線 flux と非熱的放射である硬 X 線 (26–52 keV) flux の間には以下の比例関係が存在する (Dennis & Zarro 1993)。

$$F_{\text{SXR}}(t) \propto \int_{t_0}^t F_{\text{HXR}}(t') dt', \quad (1.3.15)$$

$$\frac{d}{dt} F_{\text{SXR}}(t) \propto F_{\text{HXR}}(t). \quad (1.3.16)$$

ここで、 $F_{\text{SXR}}(t)$ 、 $F_{\text{HXR}}(t)$ は軟 X 線、硬 X 線の flux を表す。この関係から加速粒子によって生成された硬 X 線によりプラズマが加熱され、軟 X 線が生成されると解釈することができ、これを Neupert 効果と呼ぶ。

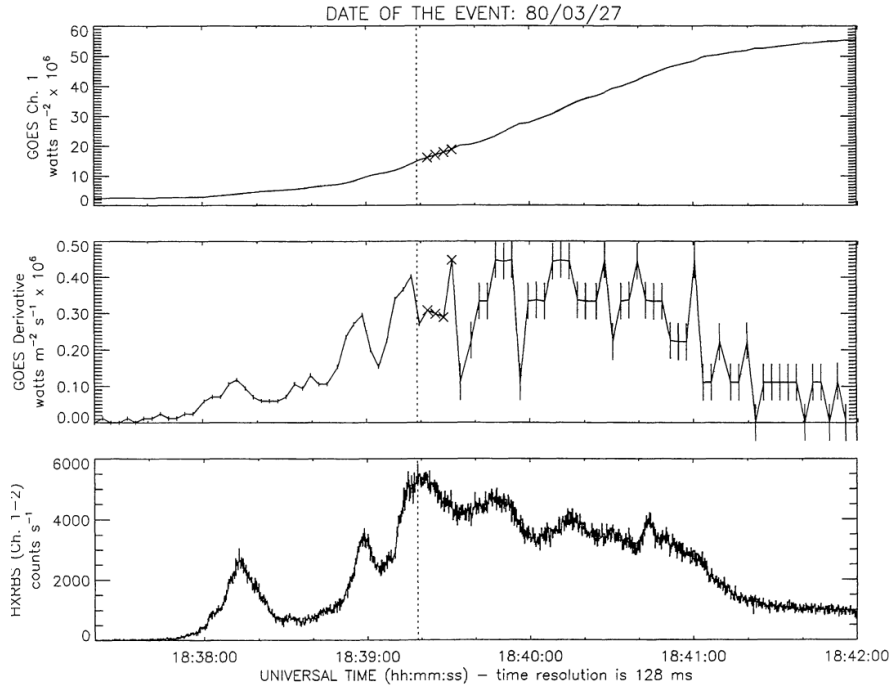


図 1.11: 1980/03/27 のフレアの同時プロット (Dennis & Zarro 1993)

1.4 硬 X 線スペクトルの時間変動

非熱的なスペクトルの光子指数はフレアの時間発展と共に変動する。soft に始まったイベントはピークに向かって hard になり、その後再び soft になる。このような振る舞いをする太陽フレアを Soft-hard-soft (SHS) モデルのフレアという (Parks & Winckler 1969; Kane & Anderson 1970)。SHS は多くのピークを持つフレアの場合、それぞれのピークで見られる。また、各ピーク毎の硬 X 線 flux とそのスペクトルの光子指数との間にはべき乗型の関係があることも報告されている。 (Grigis & Benz 2004)。いくつかの巨大フレアではピークを

過ぎた後も hard になる Soft-hard-hard (SHH) の振る舞いをするイベントや (Frost & Dennis 1971)、SHS、SHH 両方の振る舞いが見られるイベントも存在する。これら光子指数の時間変動は太陽フレアにおける粒子加速の過程を表しているとされる。

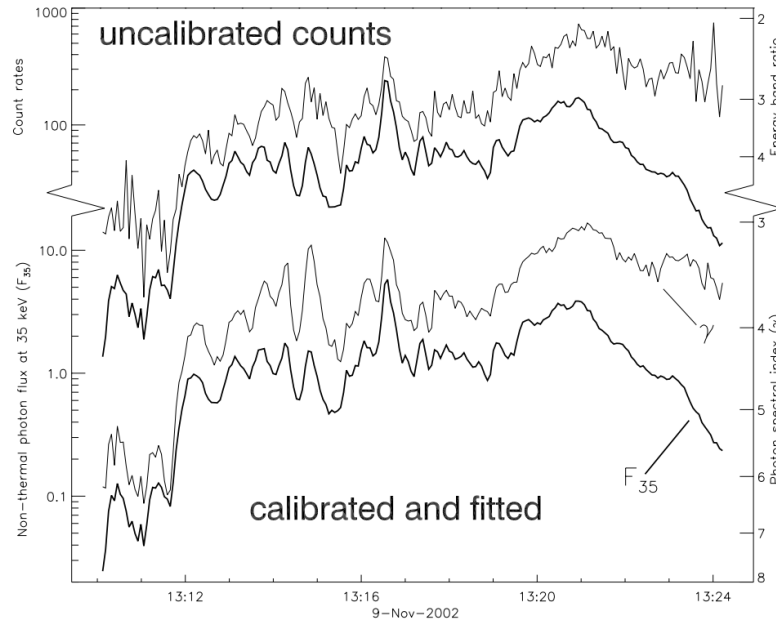


図 1.12: 硬 X 線 flux と光子指数の時間変動 (Grigis & Benz 2004)

1.4.1 Soft-hard-soft (SHS)

自己誘導電場加速モデル (Zharkova & Gordovskyy 2006)

磁気リコネクションによって加速された電子は、プラズマループの磁力線に沿ってループの足元へと降り注ぎ、その際の電子ビームにより自己誘導電場が生じる。誘導電場は主に 100 keV 以下の電子に影響を与え、低エネルギーの電子は誘導電場の影響を受けない高エネルギーの電子に比べてプラズマとの衝突で多くのエネルギーを失う。フレア発生直後は加速電子が少なく、生じる自己誘導電場も弱いいため電子は電場の影響をあまり受けずに降下する。ピーク付近では加速電子による誘導電場が強くなり、低エネルギー側の電子が多くのエネルギーを失うことでスペクトルの低エネルギー側が上昇することで相対的に hard となる。その後、ピークを超えて再び誘導電場が弱まることで低エネルギー電子への影響も少なくなり、soft となる。

統計加速モデル (Grigis & Benz 2006)

統計加速モデルでは、磁気リコネクションにより生じた乱流が電子を加速させることでスペクトルの光子指数が変動する。ここで重要になるのが、加速を表す I_{ACC} と、乱流から

の離脱時間を表す τ の 2 つの自由パラメーターである。 I_{ACC} は乱流波のエネルギー密度に比例し、周辺磁場の強度に反比例する。電子のスペクトルは $I_{ACC} \times \tau$ に比例する。フレアのピークに向けて I_{ACC} の値は大きくなり、乱流からの離脱時間が長いほど電子は加速し、スペクトルは hard になる。ピーク後は I_{ACC} が小さくなり、電子も乱流から離脱することで次第に soft になっていく。

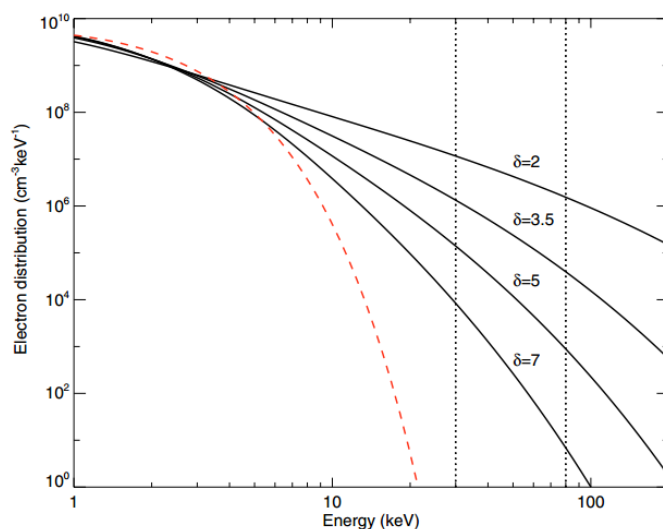


図 1.13: $I_{ACC} \times \tau$ と電子分布の関係 (Grigis & Benz 2006)

1.4.2 Soft-hard-hard (SHH)

SHH の振る舞いを見せるフレアイベントは SHS のイベントより長時間でグラデュアルな発展をするイベントで多く見つかっている。SHS のイベントに対して SHH のイベントは比較的少ない。SHH モデルは、フレアがグラデュアルに発展することで、磁力線に高エネルギー電子が長時間トラップされ、ピーク後も磁場によって加速された電子により hard になると考えられている。また、SHH イベントは高エネルギー陽子 (Solar Energetic Particle, Sep) の生成との関係が示唆されており (Kiplinger 1995)、最近の研究では SHH フレアから放射された硬 X 線の光子指数と SEP の光子指数には相関があり、SHH フレアの硬 X 線放射と SEP の生成は同一の電子が起源であることが示唆されている (Tripathi et al. 2013)。

16 Flares observed by RHESSI and associated with Protons during 2003-2006

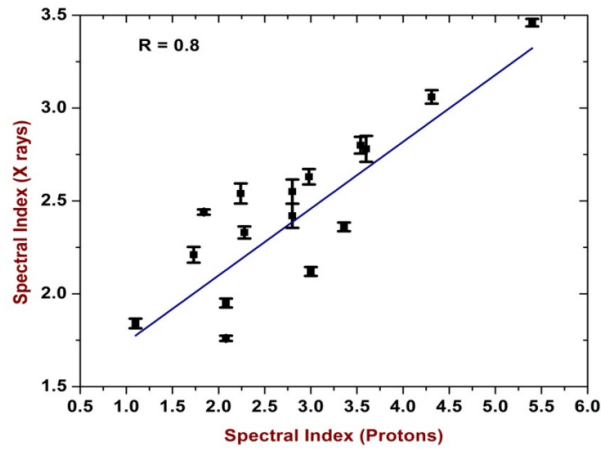


図 1.14: SHH フレアの硬 X 線と SEP の光子指数の関係 (Tripathi et al. 2013)

1.5 本研究の目的

ここまで述べてきたように、硬 X 線と軟 X 線は磁気リコネクションによる粒子加速とエネルギー解放という太陽フレアの発生機構と密接に関連した電磁放射であり、その観測は未だ解明されていない太陽フレアの加速機構を解く手がかりとされている。過去に Endo et al. (2010) では、2005 年から 2009 年にかけて太陽極小期のイベントを解析し、硬 X 線帯域における太陽フレアの特性を報告した。しかし、太陽極小期のため、イベント数が少なく統計的に有意でない暗いイベントも少なかった。そこで、本研究ではその後の Suzaku/WAM の観測から得られた結果に加えて、Endo et al. (2010) で解析されたイベントを再解析することにより、10 年間に観測された全 586 個の硬 X 線イベントの系統的解析を行い、軟 X 線帯域の観測結果と比較した。100 keV 以上のほぼ非熱的成分のみのイベントを解析することで加速粒子とプラズマ加熱の関係を探る。特に明るいイベントでは、1 秒ごとに詳細な解析を行うことで、硬 X 線放射の時間変動からフレアの加速モデルを調べた。また、10 年という 11 年太陽活動周期のおよそ 1 サイクルの系統的観測結果から、太陽活動とフレアの関係性の評価を行った。

第2章 Instrument

2.1 X線天文衛星「すざく」

「すざく」(Mitsuda et al. 2007) は、日米 24 の研究機関で共同開発され、2005 年 7 月に打ち上げられた日本で 5 番目の X 線天文衛星である。「すざく」では以下に示す 3 つの検出器が搭載されていた。

- X 線マイクロカロリメータ (X-Ray Spectrometer; XRS, Kelley et al. 2007)
- X 線撮像 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer, XIS, Koyama et al. 2007)
- 硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector, HXD, Takahashi et al. 2007)

XRS は打ち上げ直後の事故により、観測を行うことはできなかったが、HXD、XIS は 0.2-600 keV の広帯域にわたって観測を続け、2015 年の運用終了時まで多くの科学成果をあげた。また、「すざく」はこれらの機器に加え、HXD のバックグラウンド除去用アクティブシールドである広帯域全天モニター (Wideband All sky Monitor, WAM, Yamaoka et al. 2009) を検出器として使用している。

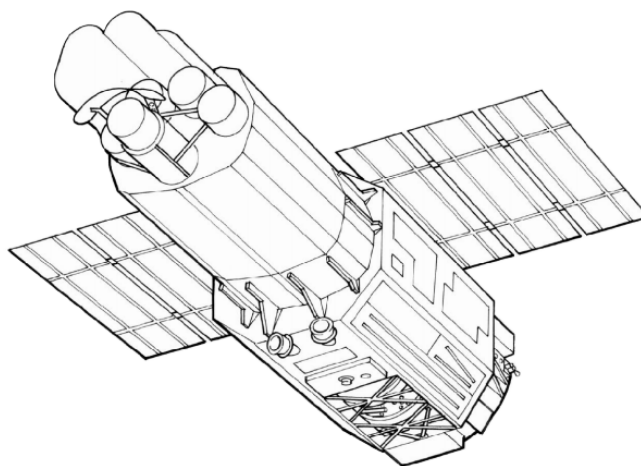


図 2.1: X 線天文衛星「すざく」(Mitsuda et al. 2007)

表 2.1: 「すざく」主要諸元	
打ち上げ日時	2005/07/10 12:30
打ち上げ場所	内之浦宇宙空間観測所
質量	1700 kg
軌道高度	570 km
軌道傾斜角	31 度
軌道周期	96 分

2.2 広帯域全天モニター (Wide band All sky Monitor; WAM)

HXD は低バックグラウンドを実現するために、検出器を 4 面で囲むように BGO シンチレータを使用している。このシンチレータはバックグラウンド除去の機能と同時に、全天観測モニターとしての機能を備えており、これを我々は WAM と呼んでいる (図 2.2)。WAM は各面ごとに独立した検出器であり、 2π sr の広視野、50-5000 keV の広いエネルギー帯域、 $400\text{cm}^2 @ 1\text{MeV}$ の巨大な有効面積を持つ (図 2.4)。特に 200 keV 以上での有効面積は X 線観測衛星の中で最大であり、これらの強みを活かし、ガンマ線バースト、太陽フレアなどの宇宙で発生する数多くの突発現象を観測してきた。表 2.2 に WAM の基本性能を示す。

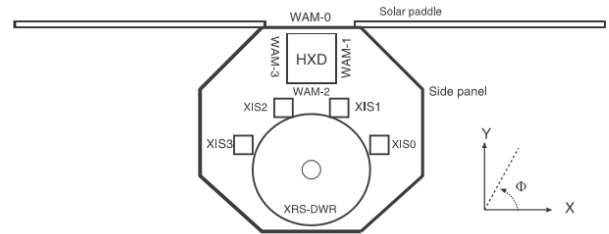
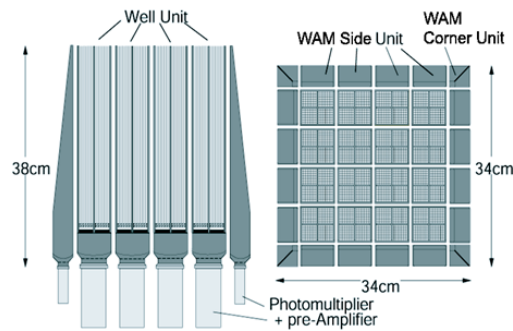


図 2.2: HXD-WAM 概略図 (Yamaoka et al. 2009)

図 2.3: 「すざく」内部構造 (Yamaoka et al. 2009)

2.2.1 構造

WAM は四隅の Corner unit を除いた 4×4 の BGO 結晶を用いたシンチレーション検出器群である。各面の 4 つのユニットは、一つの検出器として動作する。それぞれの面は「すざく」の太陽パネル側から時計回りに WAM0, WAM1, WAM2, WAM3 と呼ばれる。検出部の BGO 結晶は、高さ 38 cm、幅 5.7 cm、厚さ平均 2.6 cm の先端が薄くなる形状のもので、結晶から光電子増倍管への光伝搬の効率を高めるための反射材として結晶表面に BaSO_4 を

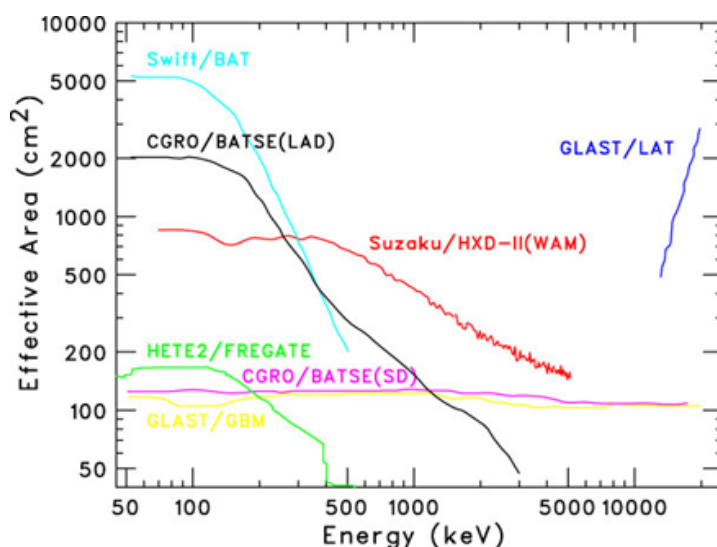


図 2.4: WAM の有効面積 (Yamaoka et al. 2009)

表 2.2: WAM の基本特性 (Yamaoka et al. 2009)

センサー物質	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}(\text{BGO})$
エネルギー帯域	50-5000 keV
視野	2π sr
幾何学面積	800 cm^2
有効面積	$400 \text{ cm}^2 @ 1\text{MeV}$
時間分解能	1 s (常時) 1/64 s (バースト時)

塗布している (図 2.5)。また、HXD の中心部を原点とし、観測の視線方向を $\theta = 0^\circ$ とすると、それぞれの面の法線方向は、WAM0 : ($\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$)、WAM1 : ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$)、WAM2 : ($\theta = 90^\circ, \phi = 270^\circ$)、WAM3 : ($\theta = 90^\circ, \phi = 180^\circ$) となる (図 2.6)。図 2.3 の内部構造からわかるように WAM0 は太陽パネル側に位置し、常に太陽方向からの X 線イベントを観測している。そのため、本研究では WAM0 の観測データを解析に用いた。

2.2.2 信号処理

WAM の信号処理部 (Transient data Processing Unit: TPU) では、各面からの反動時信号の生成と信号の波高値の変換を行う。反動時信号は HXD のバックグラウンド除去に使用される。AD 変換された信号はヒストグラム化し、エネルギースペクトルを出力する。) 図 2.7 に WAM のデータフローを示す。ヒストグラムには 54 ch の pulse height history (PH) と 4 ch の time history (TH) がある。これらのヒストグラムは WAM の 4 面でそれぞれ独立に生成されている。これらのデータの時間分解能は 1 s であり、TRN データと呼ばれ、常時保存される。また、WAM は TRN データより時間分解能がよい BST データも生成している。

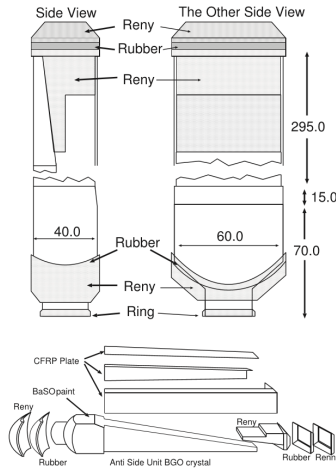


図 2.5: WAM のセンサー部 (Yamaoka et al. 2009)

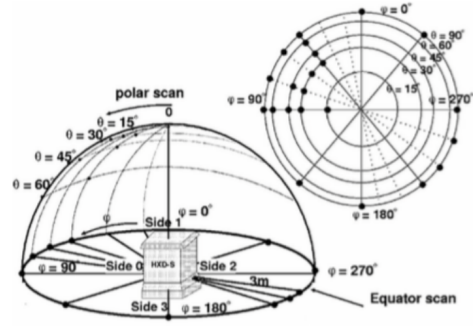


図 2.6: WAM の角度定義 (Ohno et al. 2005)

BST データはエネルギービンを 4 ch に落とす代わりに時間分解能を 1/64 s にあげたデータであり、最長 64 s まで保存される。BST データは軌道上でカウントレートに急激な変化が見られたときにトリガーされ生成される。トリガー条件は以下の式で表される。

$$S \Delta t = Bg \Delta t > \sigma \sqrt{Bg \Delta t} \quad (2.2.1)$$

ここで、 S はソースパルスのある時刻でのカウントレート、 Bg はその時刻より 8 秒前から積分したカウントレート、 Δt はサンプリングする時間、 σ は有意度を表す。WAM の 4 つの面で 1 つでもこの条件に従うものがあれば、BST データは生成される。

表 2.3: WAM のエネルギーチャンネル

TH ch	PH ch	エネルギー範囲
TH0	PH 2 - 3	50- 110 keV
TH1	PH 4 - 7	110 - 240 keV
TH2	PH 8 - 16	240 - 520 keV
TH3	PH 17 - 54	520 - 5000 keV

表 2.4: WAM のデータ

モード	ch	時間分解能	カバー時間
BST	4 ch (TH)	1/64 s	64 s (トリガー前 8 s, 後 64 s)
TRN	54 ch (PH)	1 s	常時

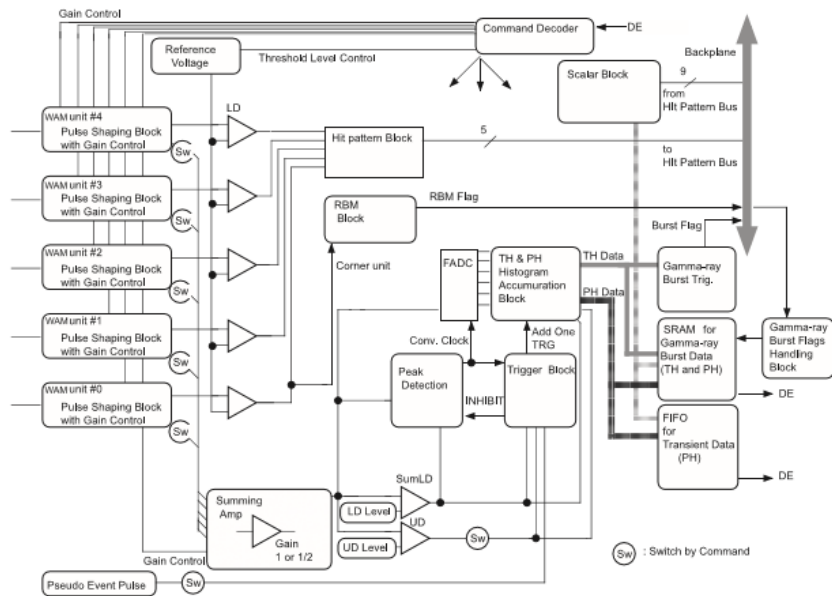


図 2.7: WAM のデータフロー (Yamaoka et al. 2009)

2.2.3 WAM のバックグラウンド

WAMのバックグラウンドとなる軌道上の荷電粒子は地磁気によるシールド (Cut Off Rigidity, COR) の影響を強く受け、COR が低い場所では荷電粒子のバックグラウンドが大きくなる。また、西経 0-60 度、南緯 20-50 度の上空 160-320 km 地帯は南大西洋地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) と呼ばれ、多くの荷電粒子がトラップされている。この帯域では、荷電粒子により検出器が放射化するため、光電子増倍管を保護するためにバイアス電圧を下げる運用をしている。図 2.8 に WAM の 1 日のライトカーブを示す。COR の変動によるカウント数の変動が見られ、SAA 通過時には高電圧を下げるため、カウント数が 0 になることも確認できる。また、SAA 通過後は大量の荷電粒子とそれに伴う検出器の放射化の影響により、バックグラウンドのカウント数が上昇している。

2.2.4 エネルギー応答関数

検出器の出力波高は検出器固有の応答を受けるため、得られたデータから入射光子のスペクトルを得るためには検出器のエネルギー応答関数を用いて変換する必要がある。WAM のエネルギー応答関数は検出器が衛星内部にあるため、衛星機体や他の検出器の影響により光子の入射角度に依存した非常に複雑なものとなっている。現在用いられている WAM の応答関数はモンテカルロシミュレーションにより数値計算され、地上試験と軌道上での天体観測結果で校正されている (Ohno et al. 2005)。図 2.9 に他衛星との相互校正の例を示す。通常、X 線、ガンマ線観測衛星の校正には明るい Crab Nebula を用いるが、WAM では明るさが足りないため、ガンマ線バーストを用いて校正を行った。また、相互校正には、WAM と観測帯域の近い Swift/BAT (Gehrels et al. 2004)、Konus-Wind (Aptekar et al. 1995) を用いた。

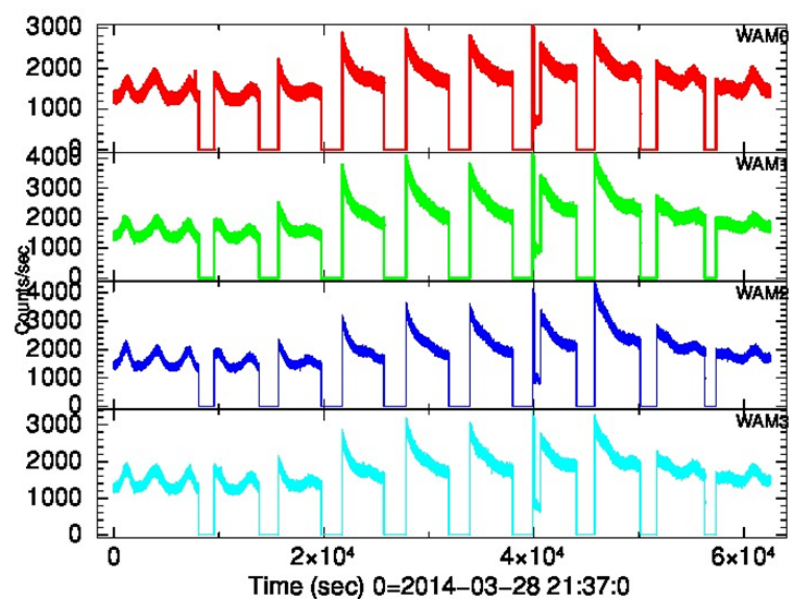


図 2.8: WAM のライトカーブ。(上から順に WAM0、WAM1、WAM2、WAM3)

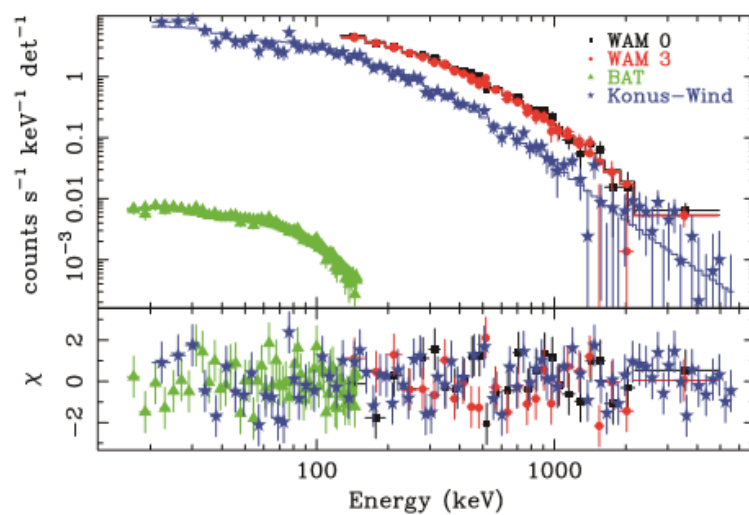


図 2.9: 他衛星との校正 (Yamaoka et al. 2009)

本研究では「すざく」の太陽パネル側に位置する WAM0 を用いて太陽フレアを解析したため、全イベントに対して入射角がそれぞれ $\phi = 90^\circ, \theta = 90^\circ$ のエネルギー応答関数を作成した。

2.3 Geostationary Operational Environment Satellite (GOES)

GOES は 1975 年から利用されているアメリカ合衆国の静止気象観測衛星シリーズであり、地球の気象観測と同時に、地球を取り巻く宇宙環境の観測も行っている。現在、軌道上には GOES 13、GOES 14、GOES 15 の 3 機が存在し、13、15 が観測を行い、14 が次期ミッションに向けて待機状態となっている。GOES には地球観測用と宇宙観測用に計 4 種類の機器が搭載されている。

2.3.1 宇宙環境モニター (Space Environment Monitor system; SEM)

SEM は、宇宙空間の荷電粒子を測定する ESP/HEPAD、軟 X 線、紫外線等の放射線を測定する XRS/EUV からなる観測システムである。本研究では、XRS/EUV で測定された軟 X 線 (1-8 Å) のピークフラックスをもとに定義された太陽フレアの規模である GOES class を解析に利用している。

表 2.5: 軟 X 線強度と GOES class

GOES class	軟 X 線強度 [ergs/cm ² /s]
X	10^{-1}
M	10^{-2}
C	10^{-3}
B	10^{-4}
A	10^{-5}

第3章 Observation and Analysis

3.1 WAMによる太陽フレアの観測

2005 年 7 月の打ち上げ以降、WAM は多くの太陽フレアを検出してきた¹。表 3.1 に 2005 年から 2014 年までのクラス別イベントを示す。2006 年から 2013 年は年間を通してモニター観測を行っているが、2005 年は打ち上げ後の検出器立ち上げ作業等が行われたため、打ち上げから約 1 カ月後の 8 月 22 日からの観測となっている。また、2014 年は太陽電池パネルと蓄電池の劣化による発生電力の低下ため日照時間のよい時間帯のみの不定期の観測となっている。

表 3.1: WAM による太陽フレアの検出数

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Total
X	9	4	0	0	0	0	5	5	9	1	33
M	18	4	7	0	0	11	54	65	35	19	213
C	26	18	2	1	3	16	72	71	76	20	302
B	2	12	3	0	0	5	3	6	4	0	35
Total	55	38	12	1	3	32	134	147	124	40	586

表 3.1 を稼働日あたりの検出数で示したのが図 3.1 左である。右は黒点相対数の変動を示しており、太陽活動の周期と太陽フレアの発生数には相関がみられる。本研究では WAM の太陽フレア検出数のうち検出数の少なかった 2006 年から 2010 年を太陽極小期 (Solar minimum)、検出数の多かった 2005 年、2011 年から 2014 年を太陽極大期 (Solar maximum) と定義した。

3.2 観測データ

「すざく」の観測データは、FITS (Flexible Image Transport System) 形式で保存される (Terada et al. 2005)。その後、FITS ファイルに各補正や時刻付けがされアーカイブに保存される。衛星のデータの FITS ファイルを First FITS File (FFF) といい、校正したものを Second FITS File (SFF) と呼ぶ。SFF はすざくチームによって提供される ftool と呼ばれる解析ツールで解析することができる。本研究では解析に必要な観測データを DARTS (Data ARchives and Transmission System) の「すざく」公式データ²にあるものを利用した。

¹<http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/HXD-WAM/WAM-GRB/>

²http://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/public_list/public_seq.html

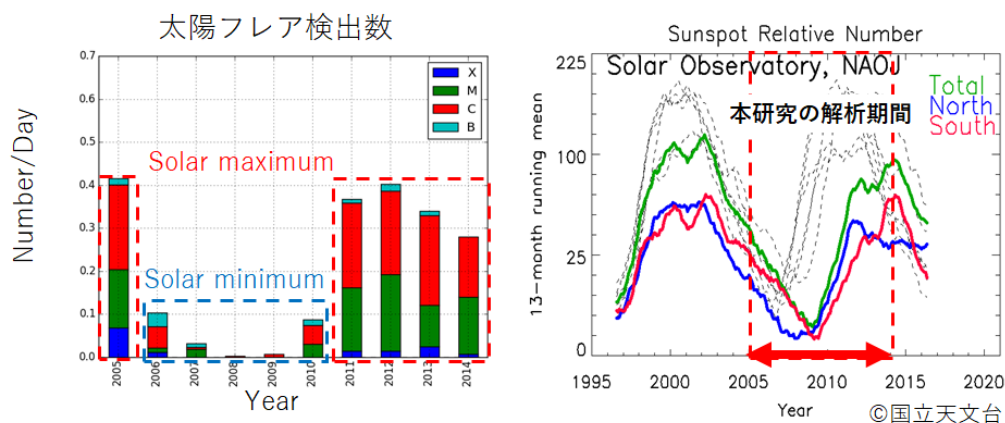


図 3.1: WAM による太陽フレア検出数の推移と黒点相対数の推移

3.3 バックグラウンド推定

WAM はバックグラウンドを取り除く機能を持たないため、正確な解析結果を得るためにバックグラウンドを見積もる必要がある。WAM のバックグラウンド推定には以下の 3 つの方法がある。

前後バックグラウンド

もっとも単純な推定方法であり、イベント前後での Count/sec 値の平均をバックグラウンドとして用いる。バックグラウンドがイベント中に変動する場合は正確な値が見積もることができないため、長時間のイベント等には不適である。

多項式バックグラウンド

イベント前後の領域で多項式フィッティングを行うことでイベント観測中のバックグラウンドの Count/sec を見積もり、それを用いる。多項式でフィッティングを行うことによりイベント中に地磁気強度が変わりバックグラウンドに変動がある場合にもより正確な値を見積もることができる。

51 日周期バックグラウンド

より長いイベントや急激にバックグラウンドが変動する軌道の場合は 51 日周期バックグラウンドが有効な推定方法となる。これは「すざく」が 51 日周期で地磁気に対して同位相を取ることから、イベントの 51 日前後の Count/sec をバックグラウンドとして用いる方法

である (Morigami 2009)。

太陽フレアはイベント時間が長いため、イベント中のバックグラウンドが変動していることが多い。前後バックグラウンド方式はバックグラウンドが変動しないような短いイベントに対しては有効だが、太陽フレアではそのようなイベントは少な。51 日周期バックグラウンド方式は、バックグラウンドを見積もりたいイベントの 51 日前後にイベントが発生している場合や、SAA 通過中には見積もることができない。また、51 日周期バックグラウンドを必要とする長時間のイベントはそもそもパイルアップしていたり、イベントの最中に地球の陰に入ったり解析できない場合も多い。そこで、本研究では短いイベントから長時間のイベントにまで対応可能な多項式バックグラウンドを用いて解析を行った。

3.4 イベントセレクション

WAM0 で観測された光度曲線に変動が見られる X 線イベントは 10 年間で 700 個を超えている。その中で次の条件を満たすものを WAM で観測できた太陽フレアイベントとして選んだ。

- GOES で同時観測しているもの
- SAA, 地食による影響がないもの
- バックグラウンドを引いたスペクトルが 5 ch 以上まで有意な信号を持つもの

GOES との同時観測は、WAM 0 で検出した X 線イベントを太陽フレア由来か判定するためのセレクション条件として必要になる。次に SAA、地食によりイベントが途中で切れてしまっているものは、正確なパラメータを見積もることができないため除外する必要がある。WAM は低エネルギー (1,2 ch) のエネルギー応答の不定性が高いため、解析に 1,2 ch のデータは使用することが好ましくない。また、power law モデルでは 3 ch 以上のピン数が必要なため、5 ch 以上の有意な信号 (ソースからバックグラウンドを引いた信号が 3σ 以上) を持つというセレクション条件を採用している。

3.5 スペクトル解析

586 個の WAM で観測されたイベントのうち³、前節のイベントセレクション条件を満たした 274 個 (太陽極大期 236 個、太陽極小期 38 個) のイベントに対し、平均スペクトル解析を行った。また、特に明るくパイルアップの影響が見られない 2013 年 10 月 28 日のイベントに対しては 1 秒毎の時系列解析を行った。なお、今回の解析には xspec version 12.8.2⁴を使用した。

³GOES と同期していないものを含めると 735 個

⁴<http://heasarc.nasa.gov/lheasoft/>

3.5.1 平均スペクトル解析

フレア全体のスペクトルを調べるために、フレアの継続時間でスペクトルを抽出した。切り出すエネルギー範囲の下限は検出器の不定性から 3 ch とし、ソースからバックグラウンドを引いた値が 3σ 以上となる値を上限とし、power law モデルで評価を行った。以下に power law モデルの式を示す。

$$A(E) = KE^{-\alpha} \quad (3.5.1)$$

ここで、 K は規格化因子、 α はスペクトルの光子指数を表す。なお、継続時間には T_{90} (光子の総カウントの 5 % から 95 % までの時間) を採用している。また、明るいイベントの高エネルギー側でスペクトルが折れ曲がるため、そのようなイベントに対しては broken power law モデルで評価を行った。以下に broken power law モデルの式を示す。

$$A(E) = \begin{cases} KE^{-\Gamma_1} & (E \leq E_{\text{break}}) \\ KE_{\text{break}}^{\Gamma_2-\Gamma_1} \left(\frac{E}{1\text{keV}}\right)^{-\Gamma_2} & (E \geq E_{\text{break}}) \end{cases}$$

ここで、 Γ_1 は折れ曲がる前のべき、 Γ_2 は折れ曲がった後のべき、 E_{break} は折れ曲がり始めるエネルギーの値である。本研究では、スペクトルに対して、power law と broken power law で評価を行い、 χ^2 検定の値が小さいモデルを採用した。図 3.3、3.4 にスペクトルとフィッティング結果の例を示す。

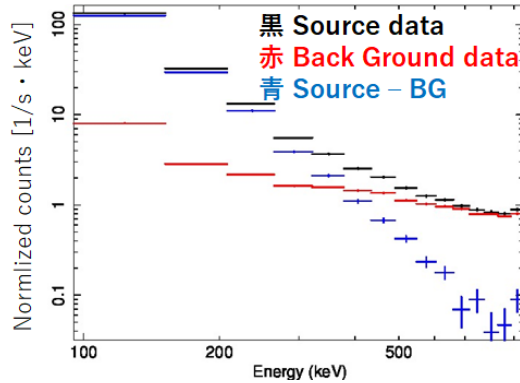


図 3.2: 2014/10/16 13:01:20 M4.3 class のスペクトル

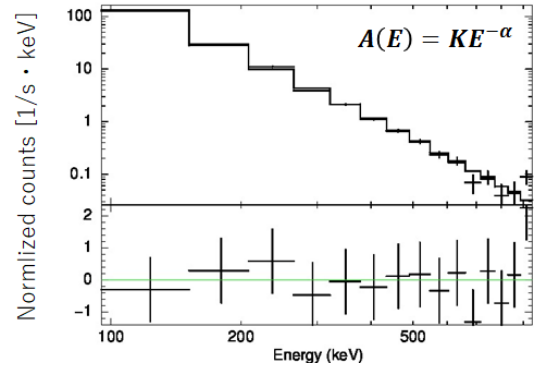


図 3.3: power law モデルによるフィッティング

3.5.2 時系列解析

2013 年 10 月 28 日に観測された X class のイベントに対して、1 秒毎にスペクトルを切り出し、power law モデルで評価を行い、イベント中のスペクトルの光子指数と flux の時間変動を調べた。エネルギー範囲の指定は平均スペクトル解析と同様の方法を用いた。

第4章 Result and Discussion

4.1 解析結果

274 個のイベントの解析結果を付録 A にまとめた。本章では、解析から得られたパラメータを用いて以下の関係を考察する。

- 硬 X 線帯域と軟 X 線帯域の相関の検証
- 太陽活動周期と各パラメータの関係
- 硬 X 線帯域の特徴
- 硬 X 線スペクトルの時間変動

4.2 硬 X 線帯域と軟 X 線帯域の相関の検証

粒子加速とプラズマ加熱の関係を調べるために、解析から得られた硬 X 線 100 – 300 keV flux [erg/cm²/s]、硬 X 線継続時間 (T_{90})、硬 X 線 100 – 300 keV fluence [erg/cm²] と GOES の観測結果から得られた軟 X 線 1.55 – 12.4 keV flux [erg/cm²/s] の散布図を図 4.1、4.2、4.3 に示す。ここで、赤いプロットは太陽極大期のイベント、青いプロットは太陽極小期のイベントを表す (3.1 節)。それぞれの相関関係を調べるため、

$$F_{\text{SXR}} = AF_{\text{HXR}}^{\alpha}, \quad (4.2.1)$$

$$F_{\text{SXR}} = At^{\alpha}, \quad (4.2.2)$$

$$F_{\text{SXR}} = AE^{\alpha}, \quad (4.2.3)$$

の冪乗型の関数で評価を行い冪の指数と相関係数を求めた。ここで、 F_{SXR} は軟 X 線 flux であり、 F_{HXR} 、 t 、 E はそれぞれ硬 X 線の flux、継続時間、fluence である。結果を表 4.1 に示す。

表 4.1: 軟 X 線帯域と硬 X 線帯域の関係

	冪	相関係数
SXR flux vs HXR flux	0.345 ± 0.071	0.385
SXR flux vs HXR T_{90}	0.753 ± 0.073	0.590
SXR flux vs HXR fluence	0.459 ± 0.717	0.641

軟 X 線 flux と硬 X 線 flux の相関 (図 4.1)

相関係数 0.385 と弱い相関があり、 0.345 ± 0.071 のべき乗型の関係が見られた。Neupert (1968) は非熱的な電波放射の flux と軟 X 線の flux に相関があることを報告しており、同じく非熱的放射である硬 X 線でも同様の関係があることが示唆される。

軟 X 線 flux と T_{90} の相関 (図 4.2)

相関係数 0.59 と相関があり、 0.753 ± 0.073 のべき乗型の関係が見られた。硬 X 線放射時間が長いほど軟 X 線 flux は高くなる傾向が見られた。

軟 X 線 flux と硬 X 線 fluence の相関 (図 4.3)

相関係数 0.641 と強い相関があり、 0.459 ± 0.072 のべき乗型の関係が見られた。これは、Dennis & Zarro (1993) が報告した Neupert effect (1.3 節) と一致する。また、熱的制動放射では、その flux はエネルギーの 0.5 乗に比例するため (1.3 節)、 0.459 ± 0.717 という値と矛盾しない。これは WAM の帯域まで加速された粒子によってプラズマが加熱され軟 X 線を生成していることを示唆する。

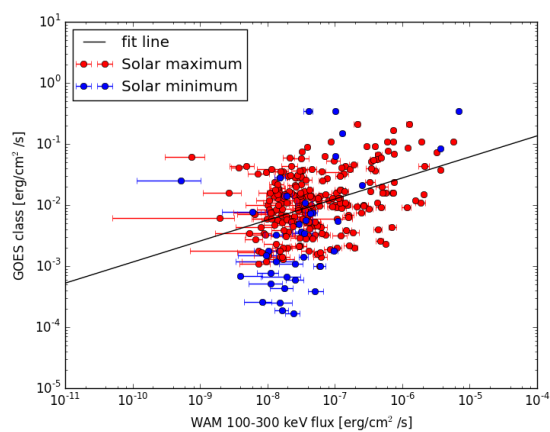


図 4.1: 軟 X 線 flux と硬 X 線 flux の相関

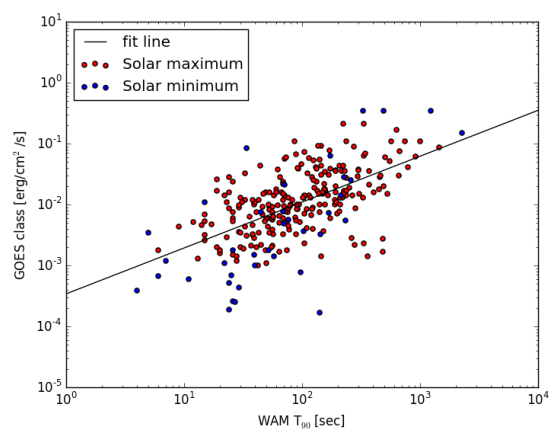


図 4.2: 軟 X 線 flux と T_{90} の相関

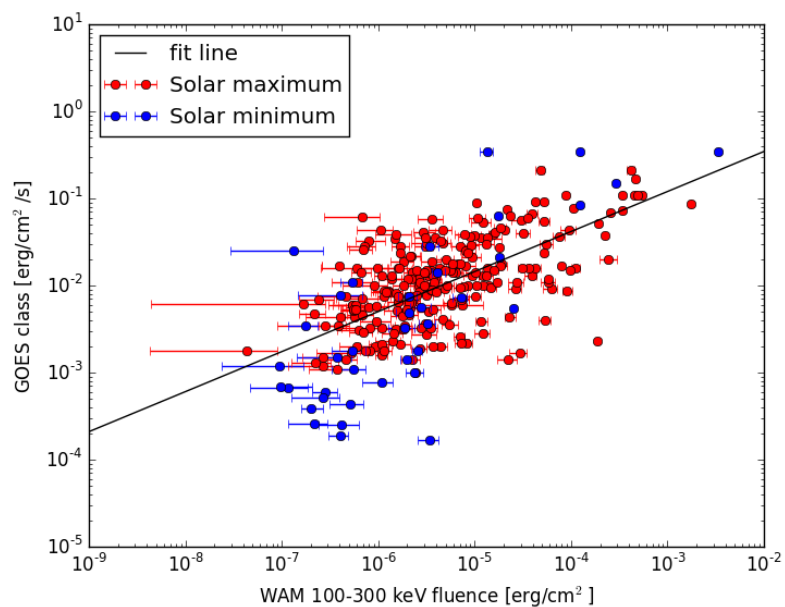


図 4.3: 軟 X 線 flux と硬 X 線 fluence の相関

4.3 太陽活動周期と各パラメータの関係

それぞれのパラメータと太陽活動期の関係性を調べるために極大期イベント 236 個と、極小期イベント 38 個の各パラメータのヒストグラムを作成した。それぞれ、図 4.4 は軟 X 線 flux、図 4.5 は硬 X 線 fluence、図 4.6 は硬 X 線 flux、図 4.7 は T_{90} 、図 4.8 は光子指数のヒストグラムを示す。図 4.4 より、極小期のイベントでは極大期のイベントに比べて軟 X 線 flux はフラットに分布している。一方で、図 4.5–図 4.8 の硬 X 線帯域のパラメータの分布から極大期、極小期による有意な差はみられない。また、前節の硬 X 線放射がインプットとなり、軟 X 線放射がアウトプットとなる結果を考慮すると、太陽極小期ではプラズマの加熱効率が悪いイベントが存在することが示唆される。

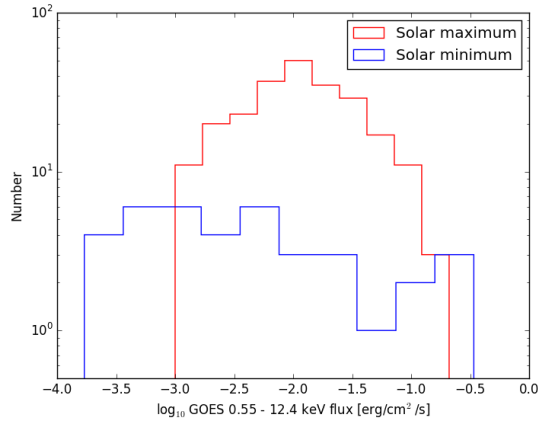


図 4.4: 軟 X 線 flux のヒストグラム

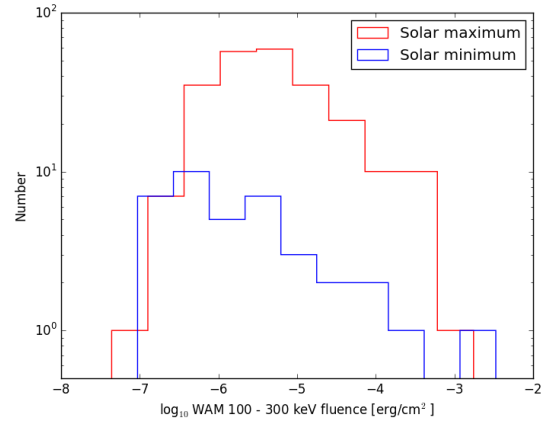


図 4.5: 硬 X 線 fluence のヒストグラム

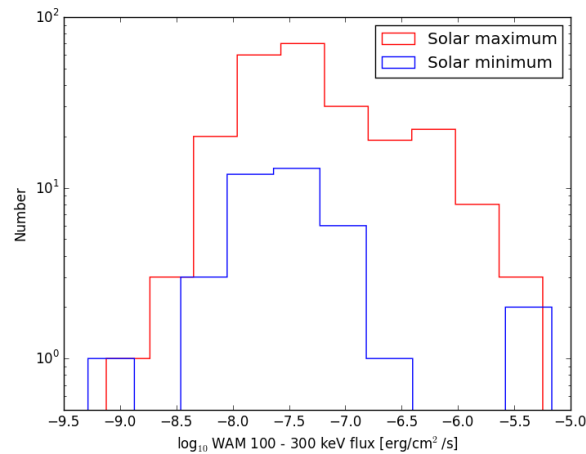


図 4.6: 硬 X 線 flux ヒストグラム

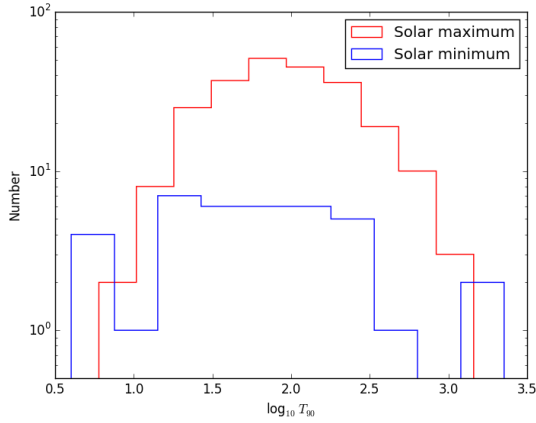


図 4.7: 硬 X 線 T_{90} のヒストグラム

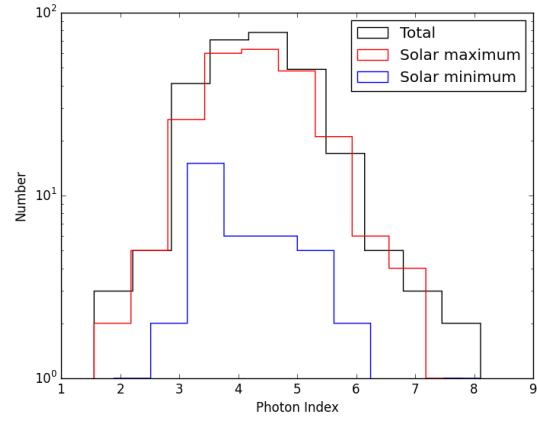


図 4.8: 硬 X 線光子指数のヒストグラム

4.4 硬 X 線帯域の特徴

硬 X 線帯域における太陽フレアの特徴を調べるため、硬 X 線スペクトルの光子指数と、flux、継続時間の関係を図 4.9、図 4.10 に示す。それぞれ、flux と光子指数の相関係数は -0.260、継続時間と光子指数の相関係数は 0.022 と共に相関は見られなかった。さらに詳しく調べるために、光子指数ヒストグラムのガウシアンフィッティング(図 4.11) から得られた中央値 $\pm 1\sigma$ (4.340 ± 0.952) から中央値 $+1\sigma$ 以上の値を Soft、中央値 -1σ の値を Hard と、Soft、Hard の間の値を Medium と定義し(表 4.2)、flux と T_{90} の分布を調べた(図 4.12、図 4.13)。図 4.12 では、Soft イベントに比べて、Hard イベントの分布が高 flux 側に伸びてい

表 4.2: 光子指数の分類

	Soft	Medium	Hard
Photon Index	< 3.388	$3.388 - 5.292$	$5.292 <$

るが、Medium イベントではさらに広く分布しており。また、図 4.13 では、Hard イベントと Soft イベントの分布に明らかな違いは見られなかった。巨大なフレアが単一の磁気ループから発生すると仮定すると、加速時間の長い巨大フレアでは電子は高エネルギーまで加速され、スペクトルの分布は Hard となり、放射される硬 X 線 flux、継続時間が光子指数に依存すると予想される。しかし、結果から光子指数と flux、継続時間に明らかな関係性は見られない。これは、巨大フレアがマイクロフレアの積み重ねである可能性を示唆する。

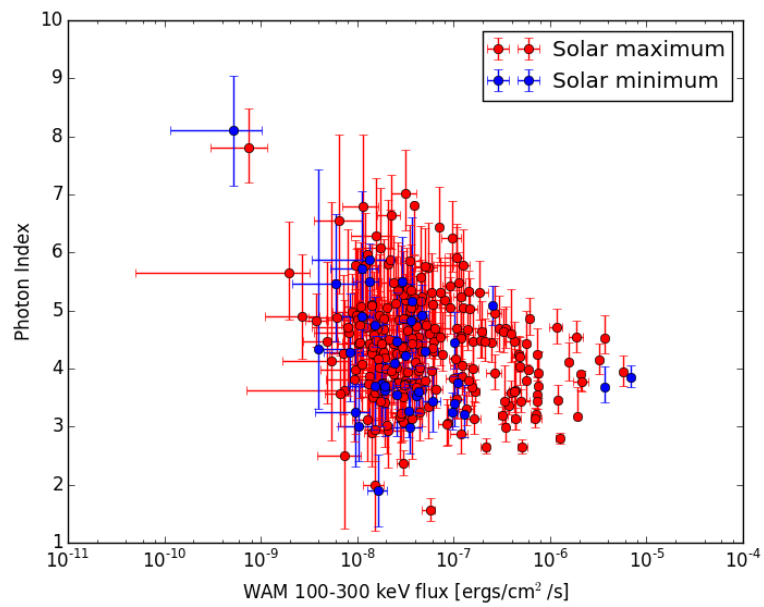


図 4.9: flux と光子指数

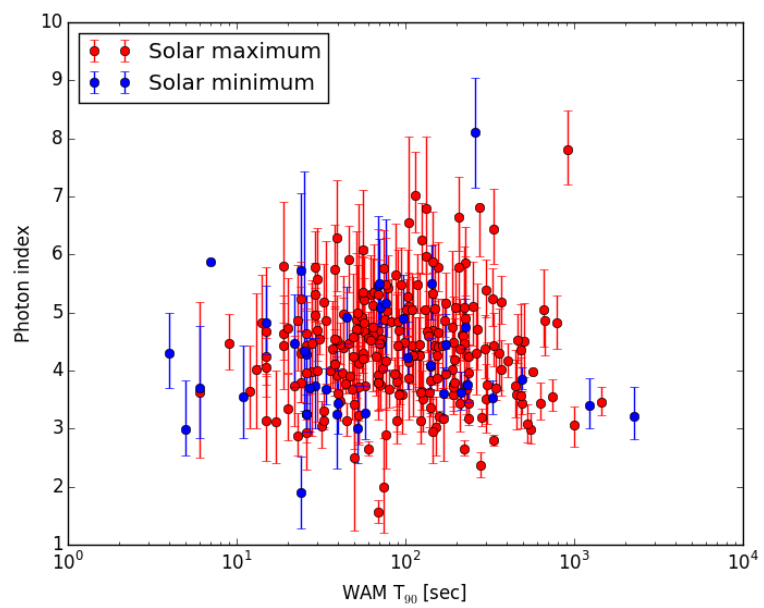


図 4.10: T_{90} と光子指数

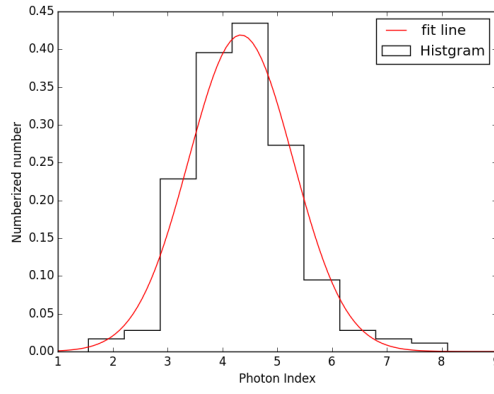


図 4.11: 光子指数ヒストグラムのガウシアンフィット結果

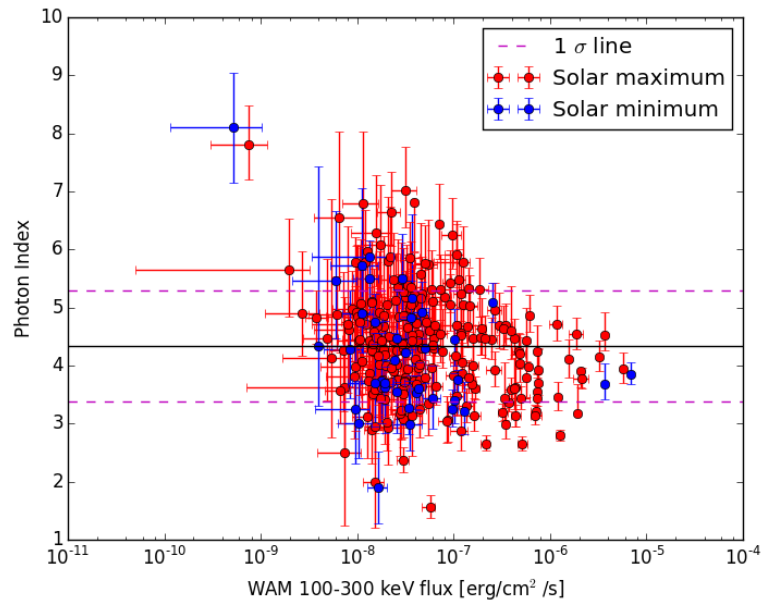


図 4.12: 図 4.9 に図 4.11 から得られた中央値と $\pm 1\sigma$ の線を加えた

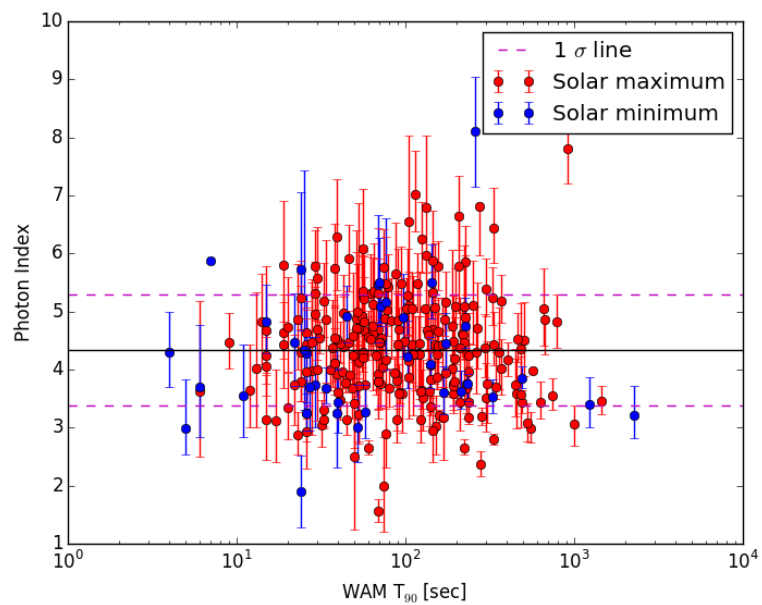


図 4.13: 図 4.10 に図 4.11 から得られた中央値と $\pm 1\sigma$ の線を加えた

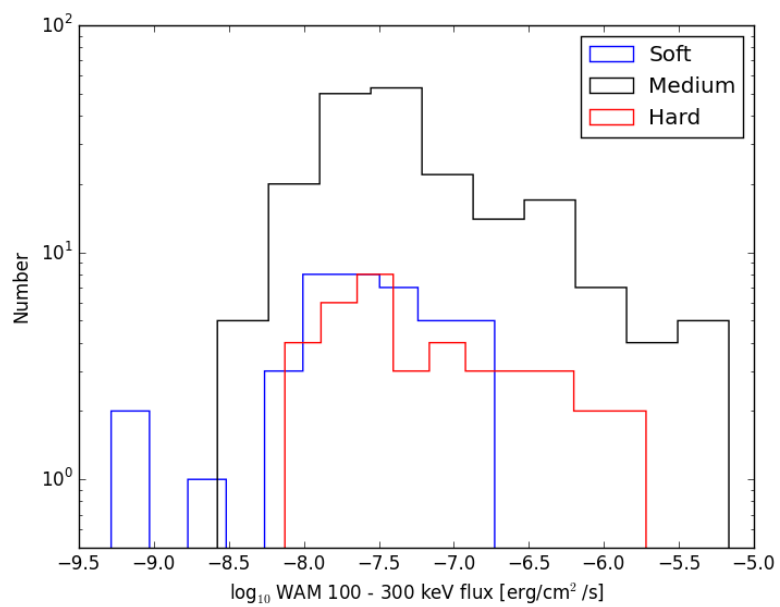


図 4.14: 硬 X 線 flux ヒストグラム

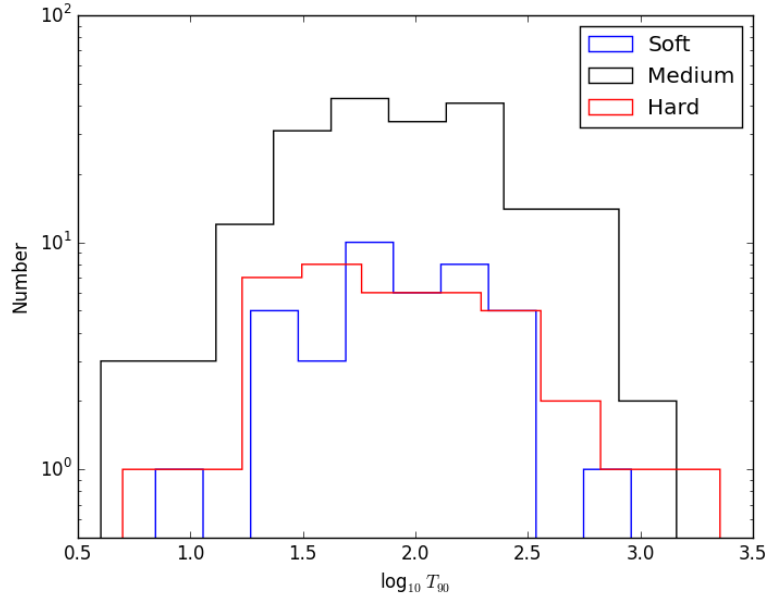


図 4.15: 継続時間のヒストグラム

4.5 硬 X 線スペクトルの時間変動

次に硬 X 線放射の時間変動を調べるため、明るくパイルアップの影響が少ない、2013/10/28 01:56:36 に観測された X1.1 クラスの太陽フレアを 1 秒ごとにスペクトルを切り出し解析を行った。その他のイベントに対する系統的な時系列解析結果については、横山卒論 (2017) でまとめられている。

図 4.16 はイベントの各帯域における光度曲線と、各帯域で比を取った Hardness ratio を示し、図 4.17 はスペクトルの光子指数の時間変動を示している。図 4.16 と図 4.17 の比較から光度曲線のピーク毎に光子指数が SHS の変動をしていることがわかる。図 4.18 は 1 秒ごとの flux と光子指数の関係を散布図にしたものである。図の色分けはタイムスケールを表したものであり、図 4.17 の色分けと対応している。図 4.18 の各時間ごとの flux と光子指数の間には $-0.157 (\pm 0.030)$ のべき乗型の関係が見られた。これは、Grigis & Benz (2004) で報告された、単一のフレアは $\gamma = A \cdot F_{35}^{-\alpha}$ ($\alpha=0.08 - 0.23$ 、 F_{35} は 35 keV flux) の関係を持ち、各ピーク毎に SHS の振る舞いするという結果と矛盾しない。また、このような関係は、Grigis & Benz (2006) で統計加速で解釈できると報告しており、統計加速によるフレアの Hardening を示唆する結果が得られた。

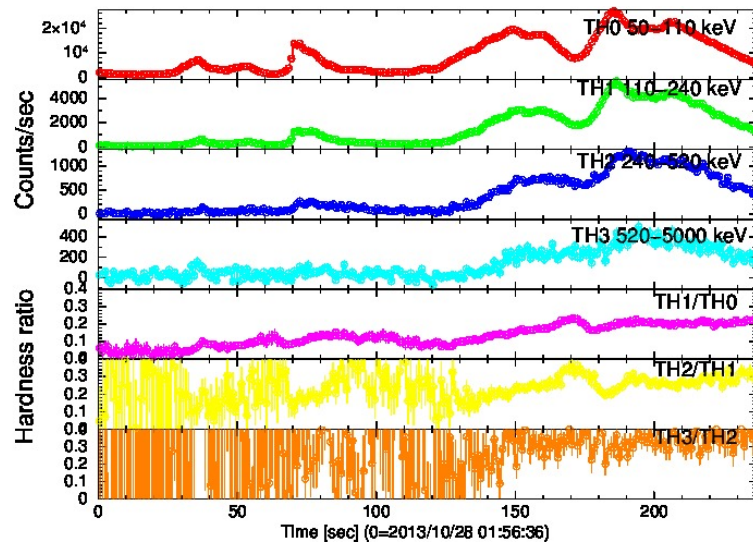


図 4.16: 2013/10/28 01:56:36 に発生したイベントの光度曲線と Hardness ratio

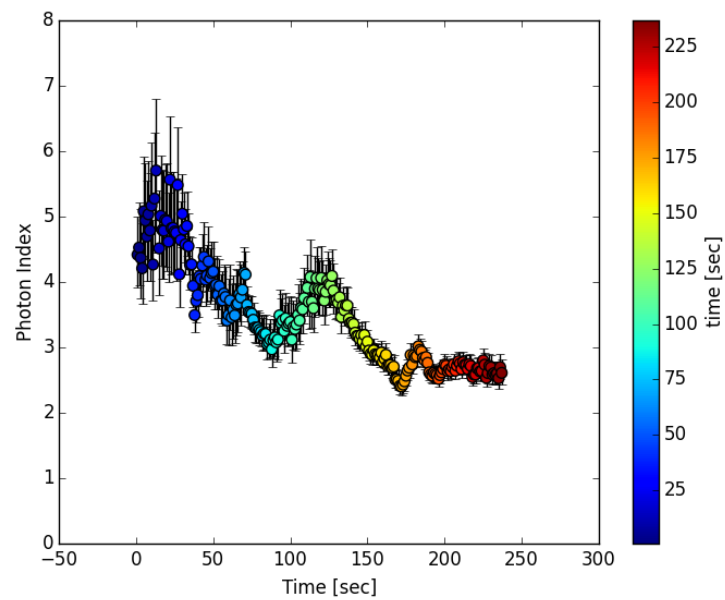


図 4.17: 2013/10/28 01:56:36 に発生したフレアの光子指数の時間変動

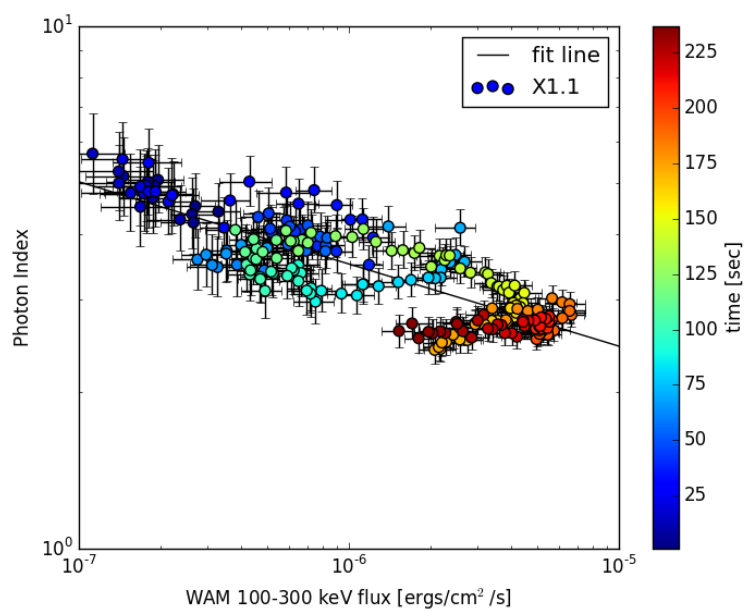


図 4.18: 1 秒毎に切り出したスペクトルから得られた各時間毎の flux と光子指数の相関

第5章 Conclusion

本研究では、Suzaku/WAM の 10 年間に観測された 586 個の太陽フレアの平均スペクトル解析を行い、11 年太陽活動周期のおよそ 1 サイクルをカバーするカタログを作成した。以下に解析より得られた結論をまとめる。

- 硬 X 線放射と軟 X 線放射の比較より、熱的制動放射のモデルと矛盾しない 0.459 ± 0.072 のべき乗型の関係が得られ、WAM の帯域まで粒子が加速されプラズマを加熱していることが示唆された。
- 太陽極小期では軟 X 線 flux がフラットに分布している一方で、硬 X 線 flux、fluence、継続時間、光子指数と太陽活動の間に有意な関係性が見られず、極小期に加速粒子によるプラズマの加熱効率が悪いイベントが存在することが示唆された。
- 硬 X 線スペクトルの光子指数と硬 X 線 flux、 T_{90} の間に明らかな相関は見られず、巨大フレアのいくつかはマイクロフレアの積み重ねである可能性が示唆された。
- 2013/10/28 01:56:36 に発生したイベントの時系列解析の結果から、各ピーク毎に SHS の振る舞いが確認でき、flux と光子指数の間に指数 $-0.157 (\pm 0.030)$ のべき乗型の関係が見られた。これにより、WAM の帯域まで粒子が加速されフレアの hardening が起きていることが示唆された。

付 録 A 太陽フレアカタログ

解析から得られた 274 個のイベントのパラメータを表 A.1、表 A.2 にまとめた。表 A.1 は broken power law、表 A.2 は power law でフィットした結果をまとめた。表の各項目については以下の通りである。

- Date : フレアの発生日
- Time : イベントのトリガー時刻
- T_{90} : 光子の総数の 5% から 95% の時間。イベントの継続時間として採用している。
- Photon index、Err+、Err- : スペクトルの光子指数とその誤差
- bake E : スペクトルの折れ曲がりのエネルギー
- flux、Err+、Err- : 硬 X 線 100 – 300 keV flux [erg/cm²/s] とその誤差
- GOES : GOES class
- GOES TIME : GOES によって観測された軟 X 線放射の継続時間
- Loc : フレアが発生した場所の光球面座標
- χ^2/dof : フィッティングによる χ^2 の値。

このうち値の求まらなかったもの、データがなかったものに関しては空欄となっている。

表 A.1: Solar flare catalog by broken power law fit

Date	Time	T_{90} [s]	photon index	Err +	Err -	brake E [keV]	flux [erg/s/cm ²]	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2005/09/16	01:46:18	144	5.326	0.353	-0.298	272	1.41E-007	M4.4			0.746
2005/09/16	19:29:39	370	5.18	0.447	-0.379	235	3.17E-008	M3.5			0.526
2005/12/02	10:09:45	170	4.863	0.352	-0.278	332	6.15E-007	M7.8			1.178
2006/04/30	01:53:13	234	3.754	0.164	-0.299	439	1.09E-007	C5.4	2820	N15E75	0.743
2006/12/13	02:22:23	493	3.856	0.2034	-0.177	660	6.81E-006	X3.4	2580	S07W22	0.736
2006/12/13	03:15:24	1235	3.399	0.478	-0.384	301	1.01E-007	X3.4			0.858
2006/12/14	22:20:38	2259	3.213	0.497	-0.392	290	1.29E-007	X1.5	4740	S06W46	0.329
2007/06/01	21:49:37	71	5.081	0.348	-0.329	319	2.55E-007	M2.1	1140	S07E89	0.973
2010/02/07	02:30:51	172	4.442	0.535	-0.445	287	1.02E-007	M6.4	1140	N21E11	0.27
2010/02/12	11:25:31	34	3.684	0.354	-0.272	450	3.65E-006	M8.3	540	N21E07	0.609
2011/07/30	02:07:00	144	4.696	0.557	-0.398	286	2.95E-007	M9.3	480	N14E35	0.444
2011/09/09	06:05:15	236	4.24	0.735	-0.283	248	7.74E-008	M2.7	960	N14W48	0.094
2011/09/25	04:40:51	668	4.857	0	-0.592	219	3.23E-008	M7.4	2040	N13E50	1.22
2012/03/05	03:47:42	746	3.552	0.302	-0.244	864	7.34E-007	X1.1	7860	N19E58	1.643
2012/03/05	04:29:16	999	3.069	0.313	-0.381	450	8.80E-008	X1.1	7860	N19E58	0.295
2012/03/09	03:39:04	335	6.431	0.709	-0.601	251	6.99E-008	M6.3	3360	N15E82	0.5
2012/05/06	17:45:52	30	5.579	0.876	-0.725	240	4.56E-008	M1.3	660	N11E63	0.74
2012/05/09	21:02:22	130	5.045	0	-0.319	450	1.25E-007	M4.1	480	N12E26	0.27
2012/05/17	01:29:52	553	2.981	0.286	-0.236	488	3.49E-007	M5.1	2940	N07W88	2.446
2012/06/28	16:10:59	69	3.933	0.345	-0.273	495	7.58E-007	M2.4	480	N16E46	0.424
2012/07/04	04:29:01	332	4.431	0.567	-0.35	354	5.60E-007	M2.3	1020	S17E18	2.39
2012/07/04	16:35:39	154	3.866	0.532	-0.208	332	1.22E-007	M1.8	900	N14W33	1.35
2012/07/05	01:07:07	132	5.966	0	-1.29	160	1.27E-008	M2.4	600	S18W26	0.24
2012/07/05	20:12:00	24	3.798	0.599	-0.35	354	5.60E-007	M1.6	1140	S18W37	0.491

Date	Time	T_{90} [s]	Photon index	Err +	Err -	brake E [keV]	flux [erg/s/cm ²]	GOES	GOES TIME [s]	Loc	dof
2012/07/08	16:25:27	342	3.704	0.59	-0.202	320	7.54E-007	M6.9	1140	S17W74	1.218
2012/08/06	04:35:44	49	4.243	0.455	-0.37	338	7.39E-007	M1.6	480	S14E88	0.657
2012/10/20	18:09:22	275	6.811	0	-0.85	124	3.85E-008	M9.0	840	S12E88	0.3
2012/11/08	02:18:01	235	3.44	0.623	-0.38	333	3.34E-007	M1.7	2820	N13E89	1.965
2012/11/13	02:02:31	73	4.03	0.521	-0.307	359	4.84E-007	M6.0	480	S25E46	0.42
2013/05/02	05:04:44	40	3.611	0.527	-0.353	364	4.30E-007	M1.1	1260	N10W26	0.54
2013/05/13	02:08:37	634	3.429	0.367	-0.267	450	7.29E-007	X1.7	2940	N11E85	
2013/05/15	01:37:58	570	3.99	0	0	251	5.91E-007	X1.1	2160	N12E64	0.818
2013/06/07	01:05:48	42	3.966	0	-0.506	241	5.87E-008	C1.0	660	S31W70	0.457
2013/10/28	01:56:36	237	3.167	0.5228	0	456	1.91E-006	X1.1	1860	N04W66	0.526
2013/10/28	20:54:27	47	3.908	0	-0.284	733	2.07E-006	M1.5	840	N07W83	0.682
2013/11/06	13:42:56	62	4.524	0.393	-0.263	513	3.65E-006	M3.8	840	S12E37	0.536
2013/11/08	04:23:53	86	3.94	0.28	-0.231	518	5.66E-006	X1.1	540	S14E15	0.789
2014/01/07	10:12:02	105	4.143	0.292	-0.229	494	3.21E-006	M7.2	1800	S13E11	0.5698
2014/03/12	22:32:00	136	4.609	0.755	-0.502	264	3.90E-007	M9.3	660	N15W78	0.276
2014/10/21	13:37:06	38	4.108	0.351	-0.314	579	1.55E-006	M1.2	300	S14E35	0.483

表 A.2: Solar flare catalog by power law fit

Date	Time	T_{90} [s]	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2005/08/23	22:00:55	43	4.979	0.646	-0.54	8.88E-009	2.60E-009	-3.34E-009	C3.4			1.27
2005/08/28	10:19:39	159	3.208	0.107	-0.1	7.09E-007	6.61E-008	-7.49E-008	M1.6			1.397
2005/09/09	05:34:49	910	7.807	0.665	-0.592	7.54E-010	3.96E-010	-4.51E-010	M6.2			0.0006
2005/09/10	22:37:08	224	2.656	0.138	-0.126	2.14E-007	1.78E-008	-2.16E-008	X2.1			0.935
2005/09/10	21:31:50	334	2.8	0.092	-0.087	1.27E-006	1.04E-007	-1.40E-007	X2.1			0.949
2005/09/10	19:25:27	790	4.816	0.474	-0.435	3.74E-009	1.24E-009	-8.44E-010	M4.1			2.21
2005/09/10	10:26:40	75	4.885	0.656	-0.603	6.11E-009	3.13E-009	-2.96E-009	C7.6			1.11
2005/09/11	02:32:42	157	5.779	0.441	-0.403	9.53E-009	1.12E-007	5.23E-008	M3.4			1.52
2005/09/11	07:07:55	9	4.462	0.516	-0.442	6.29E-008	1.36E-008	-1.28E-008	C4.4			1.51
2005/09/12	00:47:07	57	4.679	0.508	-0.44	1.89E-008	6.18E-009	-5.25E-009	C3.3			1.39
2005/09/12	19:35:11	15	4.047	0.592	-0.506	1.22E-007	2.96E-008	-3.05E-008	C3.2			3.403
2005/09/12	19:39:35	38	4.109	0.605	-0.544	3.97E-008	1.10E-008	-1.40E-008	C3.2			2.26
2005/09/13	08:31:00	6	3.616	1.57	-1.11	7.32E-009	7.47E-009	-6.61E-009	C1.8			0.03
2005/09/14	08:59:03	279	2.368	0.235	-0.21	3.00E-008	4.15E-009	-4.45E-009	C2.2			0.23
2005/09/15	04:59:01	15	4.238	0.33	-0.291	4.74E-007	4.83E-008	-6.52E-008	C2.6			1.706
2005/09/16	14:42:20	87	5.643	0.887	-0.797	1.95E-009	1.30E-009	-1.90E-009	C6.1			0.33
2005/11/14	14:20:21	93	3.609	0.206	-0.192	1.67E-007	1.91E-008	-1.81E-008	M3.9			1.58
2005/11/19	20:35:26	26	4.434	0.75	0.626	1.04E-008	5.68E-009	-4.07E-009	C1.5			0.48
2005/12/01	04:52:16	56	4.3	0.674	-0.626	1.42E-008	6.06E-009	-6.01E-009	C5.7			0.009
2005/12/02	20:26:41	228	4.893	1.08	-0.728	2.65E-009	1.44E-009	-1.55E-009	M1.6			8.52
2006/04/03	12:02:03	52	3.015	0.718	-0.608	1.04E-008	3.88E-009	-4.12E-009	C1.8	360	S16E05	0.091
2006/04/06	05:31:46	213	3.634	0.355	-0.308	1.93E-008	3.71E-009	-2.56E-009	M1.4	840	S08W54	0.855
2006/08/28	11:04:05	26	3.244	0.349	-0.297	9.79E-008	1.20E-008	-1.16E-008	C1.8	360	S04W23	0.665
2006/08/29	17:39:16	4	4.293	0.71	-0.585	5.07E-008	1.66E-008	-1.07E-008	B3.9	300	S04W40	0.908
2006/11/05	12:23:34	103	4.221	0.615	-0.543	3.17E-008	5.71E-009	-6.34E-009	C3.7	1440	S06W13	1.92
2006/11/08	02:09:41	6	3.694	1.08	-0.848	1.94E-008	1.16E-008	-1.15E-008	B6.4	480	S03E81	0.59
2006/11/08	04:35:03	29	3.74	0.814	-0.731	1.77E-008	6.27E-009	-6.92E-009	B4.3	840	S04E89	0.36
2006/11/09	20:34:41	26	4.288	1.001	-0.859	8.30E-009	3.04E-009	-3.78E-009	B2.6	600	S00E57	0.17
2006/11/09	02:07:58	27	3.709	0.856	-0.759	1.53E-008	8.07E-009	-6.36E-009	B2.5			0.005
2006/11/10	23:10:24	25	4.346	0.189	-1.04	3.93E-009	4.36E-009	0.00E+000	B6.8	660	S03E53	2.23

Date	Time	T_{90} [s]	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME	Loc	χ^2/dof
2006/11/11	07:39:12	97	4.9	0.756	-0.674	1.12E-008	3.30E-009	-4.20E-009	B7.8	420	S08E41	0.05
2006/11/11	17:42:27	141	4.093	0.4648	-0.4103	2.42E-008	5.52E-009	-5.99E-009	B1.7	420	S08E41	1.81
2006/11/12	21:48:55	142	5.497	0.664	-0.608	1.34E-008	3.28E-009	-4.40E-009	C3.3	1080	S07E23	0.02
2006/12/07	00:34:05	24	1.897	0.613	-0.613	1.67E-008	3.66E-009	-4.00E-009	C1.9	360	S08E55	0.45
2006/12/13	03:56:24	328	3.529	0.311	-0.281	4.13E-008	5.98E-009	-7.04E-009	X3.4			0.529
2007/06/01	14:50:12	226	4.759	0.477	-0.39	1.53E-008	3.24E-009	-2.73E-009	M2.8	2160	S08E89	1.09
2007/06/02	06:05:20	258	8.11	0.931	-0.969	5.19E-010	5.12E-010	-4.05E-010	M2.5	5200	S08E90	1.28
2008/12/11	09:23:57	58	3.266	0.467	-0.44	3.45E-008	5.92E-009	-4.96E-009	C1.4			0.061
2009/12/10	10:57:19	5	2.987	0.845	-0.452	3.51E-008	1.20E-008	-1.17E-008	C3.4	180	N20E65	0.408
2009/12/18	18:53:15	45	4.922	0.516	-0.452	4.67E-008	8.24E-009	-1.08E-008	C7.6	600	N27W41	0.449
2009/12/22	04:54:05	167	3.612	0.444	-0.381	4.31E-008	6.96E-009	-7.39E-009	C7.2	600	S28W44	1.27
2010/01/21	10:47:26	22	4.464	0.852	-0.747	2.54E-008	8.18E-009	-1.05E-008	C1.1	660	S25E72	0.74
2010/02/08	12:00:15	15	4.832	0.639	-0.552	3.64E-008	9.21E-009	-9.10E-009	M1.1	540	N21W07	0.19
2010/02/08	04:11:32	69	5.467	1.195	-0.998	5.94E-009	3.92E-009	-3.81E-009	C7.7	960	N26E07	0.34
2010/03/27	05:14:39	7	5.877	0	0	1.34E-008	1.05E-008	-1.00E-008	C1.2	360	N14E21	0.004
2010/06/12	04:00:49	40	3.429	0.566	-0.512	5.99E-008	1.26E-008	-1.16E-008	C1.0	1200	N23W50	1.14
2010/06/14	00:47:37	39	3.248	1.086	-0.939	9.58E-009	3.89E-009	-5.88E-009	C1.5	420	N26W70	0.66
2010/09/04	07:02:32	11	3.555	0.871	-0.722	2.57E-008	8.18E-009	-7.03E-009	B6.0	360	N25W66	0.96
2010/10/31	04:28:22	76	5.157	1.444	-1.149	3.69E-008	9.32E-009	-8.96E-009	C5.7	300	N21W71	0.31
2010/10/31	01:14:37	24	5.72	1.337	-1.048	1.12E-008	5.42E-009	-5.95E-009	B5.1	240	N18W66	0.63
2010/11/03	12:13:29	70	5.491	0.785	-0.684	2.96E-008	2.21E-009	-8.06E-009	C4.9	840	S21E88	0.56
2011/02/10	06:56:16	41	3.476	0.395	-0.343	1.08E-007	1.87E-008	-1.63E-008	C2.0	1800	N18W87	0.447
2011/02/14	19:28:52	69	4.687	1.746	-1.53	1.07E-007	7.16E-008	-8.07E-008	C6.6	780	S20W04	0.28
2011/02/16	05:42:42	55	4.917	1.154	-0.957	9.74E-009	3.99E-009	-3.64E-009	C5.9	300	S20W56	0.49
2011/03/01	03:25:29	26	2.924	0.771	-0.638	2.10E-008	6.46E-009	-6.04E-009	C6.0	7800	N26E31	0.653
2011/03/06	14:44:01	24	5.233	0.641	-0.541	4.72E-008	8.82E-009	-1.07E-008	C8.6	360	N22W39	0.342
2011/03/06	16:29:14	15	4.678	1.105	-0.918	1.62E-008	6.84E-009	-6.13E-009	C6.9	480	N22W39	0.52
2011/03/07	20:18:12	191	3.584	0.218	-0.195	3.91E-007	5.34E-008	-5.03E-008	M3.7	1740	N30W48	1.095
2011/03/07	13:59:34	126	3.517	0.654	-0.56	1.44E-008	3.81E-009	-3.63E-009	M1.9	1560	N11E21	0.04
2011/03/07	08:01:23	58	3.731	0.538	-0.461	3.86E-008	6.99E-009	-7.36E-009	M1.4	960	N27W46	0.998

Date	Time	T_{90}	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2011/03/07	05:09:48	33	5.18	0.653	-0.6098	8.00E-008	1.42E-008	-1.89E-008	M1.2	1140	N23W47	0.2
2011/03/08	10:41:45	125	6.249	0.631	-0.58	9.76E-008	2.04E-008	-2.38E-008	M5.3	540	S17W88	0.07
2011/03/08	03:41:38	149	4.435	0.758	-0.682	2.35E-008	7.23E-009	-6.54E-009	M1.5	1260	S21E72	0.01
2011/03/12	04:35:52	103	5.282	0.792	-0.697	3.22E-008	8.72E-009	-7.59E-009	M1.3	900	N07W35	0.04
2011/03/23	02:11:29	105	5.103	0.585	-0.501	6.03E-008	1.12E-008	-1.27E-008	M1.4	1260	S18E70	1.47
2011/03/25	23:14:02	140	3.836	0.358	-0.318	1.00E-007	1.82E-008	-1.74E-008	M1.0	1320	S12E26	0.899
2011/03/31	01:59:35	28	3.976	1.52	-1.101	9.54E-009	4.17E-009	-5.35E-009	C1.2	600	N15E29	0.61
2011/04/22	15:57:12	69	1.559	0.21	-0.187	5.71E-008	7.01E-009	-1.07E-008	M1.2	360	S18E36	0.222
2011/05/01	23:26:47	64	5.124	0.807	-0.7104	2.53E-008	7.38E-009	-6.12E-009	C6.5	840	N21W88	0.007
2011/05/29	21:07:35	284	3.19	0.1617	-0.148	3.21E-007	4.44E-008	-3.62E-008	C8.6	1080	S19E72	0.496
2011/06/14	21:41:21	330	5.241	0.5211	-0.468	1.19E-007	1.29E-008	-2.04E-008	M1.3	2040	N14E78	0.36
2011/06/16	10:18:09	197	5.095	0.6531	-0.3116	3.80E-008	6.71E-009	-1.01E-008	C7.1	960	N15E56	0.31
2011/06/19	15:20:00	17	3.121	0.885	-0.706	1.27E-008	4.01E-009	-3.93E-009	C4.7	540	S15W77	0.42
2011/07/28	02:22:59	12	3.635	0.801	-0.623	4.67E-008	1.33E-008	-1.28E-008	C5.2	600	N18E31	1.16
2011/08/02	06:00:10	230	3.752	0.582	-0.498	2.56E-008	5.67E-009	-6.19E-009	M1.4	5340	N17W12	1.72
2011/08/03	13:26:54	507	4.507	0.651	-0.616	2.14E-008	3.68E-009	-4.24E-009	M6.0	4380	N17W30	0.15
2011/08/04	13:05:40	56	5.269	0.764	-0.62	3.03E-008	7.46E-009	-7.82E-009	C2.1	480	N16W09	0.58
2011/08/04	00:49:06	64	4.628	0.205	-0.983	8.19E-009	3.82E-009	-4.60E-009	C1.7	180	N14W37	0.18
2011/08/08	18:03:25	215	4.614	0.429	-0.384	6.31E-008	9.91E-009	-9.66E-009	M3.5	1080	N15W62	1.46
2011/09/08	15:42:59	89	3.129	0.189	-0.171	4.39E-007	6.44E-008	-4.58E-008	M6.7	1200	N14W37	1.015
2011/09/20	06:48:06	19	4.646	0.514	-0.467	1.93E-007	2.25E-008	-2.79E-008	C2.0	960	S44E82	0.633
2011/09/22	09:55:44	39	6.279	0.998	-0.901	1.57E-008	6.22E-009	-7.16E-009	M1.1	960	N24W55	0.22
2011/09/23	00:31:24	62	5.313	0.67	-0.614	5.83E-008	1.15E-008	-1.35E-008	C9.6	480	N09E89	0.17
2011/09/24	20:34:23	114	7.027	0.739	-0.648	3.18E-008	9.61E-009	-9.18E-009	M5.8	780	N13E52	0.005
2011/09/24	19:11:17	655	5.053	0.699	-0.642	2.02E-008	3.73E-009	-4.71E-009	M3.0	1920	N12E42	0.92
2011/09/24	07:02:36	51	4.875	1.147	-0.958	1.14E-008	3.88E-009	-5.49E-009	C5.9	420	S82E05	0.63
2011/09/26	05:06:21	92	4.694	0.381	-0.338	3.49E-007	5.42E-008	-6.23E-008	M4.0	420	N13E34	0.363
2011/09/26	14:40:35	65	5.342	0.825	-0.7051	2.63E-008	6.13E-009	-5.21E-009	M2.8	540	N12E30	2.54
2011/09/28	12:29:11	53	4.708	0.323	-0.286	1.18E-006	1.56E-007	-2.07E-007	C9.3	720	N15W02	1.774
2011/09/30	18:59:41	80	3.673	0.352	-0.313	1.53E-007	2.04E-008	-2.71E-008	M1.0	1200	N09E03	2.517

Date	Time	T_{90}	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2011/10/02	17:21:11	101	5.059	0.519	-0.465	9.22E-008	1.62E-008	-1.69E-008	M1.3	420	N10W55	0.2
2011/10/21	12:55:51	221	4.594	0.462	-0.405	5.58E-008	8.37E-009	-9.18E-009	M1.3	900	N05W79	0.687
2011/11/02	21:55:41	207	6.649	0.681	-0.592	2.25E-008	5.55E-009	-6.31E-009	M4.3	620	N20E77	0.18
2011/11/05	20:35:19	94	5.48	0.646	-0.558	2.82E-008	6.21E-009	-7.13E-009	M1.0	1920	N19E41	0.862
2011/11/15	12:37:12	250	5.11	0.762	-0.676	1.43E-008	3.63E-009	-3.06E-009	M1.9	1200	N21W72	0.002
2011/12/14	14:58:11	26	3.251	0.557	-0.48	4.40E-008	8.11E-009	-6.44E-009	C7.5	600	S19W89	0.519
2011/12/23	19:15:45	53	4.135	2.729	-1.379	5.35E-009	3.39E-009	-3.67E-009	C3.4	700	N22W80	1.28
2011/12/24	08:35:53	96	3.584	0.801	-0.667	1.63E-008	4.42E-009	-4.27E-009	C5.2	1260	S18E70	0.2
2011/12/25	11:23:02	91	3.589	0.502	-0.439	2.89E-008	6.06E-009	-5.16E-009	C8.4	660	S23W22	0.18
2011/12/25	08:51:39	89	3.902	0.606	-0.517	2.38E-008	4.26E-009	-4.53E-009	C5.5	720	S21W18	0.2
2011/12/26	02:19:34	304	3.754	0.737	-0.682	1.84E-008	4.41E-009	-3.13E-009	M1.5	1300	S21W33	0.62
2011/12/30	03:06:54	43	4.391	0.859	-0.713	3.17E-008	8.52E-009	-8.52E-009	M1.2	600	S25E65	1.26
2012/01/14	13:16:21	71	3.755	0.465	-0.404	4.48E-008	8.32E-009	-9.00E-009	M1.4	360	N14E88	1.45
2012/01/23	03:32:30	1447	3.447	0.268	-0.223	1.21E-006	0.00E+000	0.00E+000	M8.7	1260	N33W21	
2012/03/04	11:05:11	492	3.442	0.2032	-0.19	4.94E-007	1.12E-007	-9.02E-008	M2.0	6420	N16E65	1.52
2012/03/05	18:35:35	46	4.46	0.549	-0.497	1.60E-007	3.12E-008	-2.60E-008	C6.8	480	N16E45	0.693
2012/03/06	07:45:13	15	3.141	0.769	-0.706	3.74E-008	9.60E-009	-9.87E-009	C5.3	960	N16E37	2.29
2012/03/14	15:14:11	458	3.581	0.606	-0.593	1.54E-008	4.04E-009	-2.82E-009	M2.8	1680	N13E05	2.73
2012/04/24	07:41:46	151	3.026	0.531	-0.484	2.02E-008	3.43E-009	-2.67E-009	C3.7	420	N12E83	1.16
2012/05/05	13:21:36	114	4.268	0.654	-0.626	3.04E-008	8.68E-009	-7.46E-009	M1.4	600	N11E78	0.73
2012/05/07	17:23:29	41	4.45	0.3798	-0.337	2.46E-007	3.55E-008	-4.16E-008	C7.4	600	N12E58	0.661
2012/05/07	03:21:32	480	3.569	0.661	-0.565	6.57E-009	1.77E-009	-1.95E-009	C2.7	660	N11E63	1.66
2012/05/08	13:02:35	236	3.957	0.5	-0.456	4.36E-008	6.75E-009	-9.43E-009	M1.4	600	N13E46	1.87
2012/05/09	14:06:01	46	5.907	0.595	-0.56	1.07E-007	1.94E-008	-2.63E-008	C9.1	600	N13E32	0.0001
2012/05/10	20:22:27	228	5.86	0.614	-0.572	3.55E-008	8.86E-009	-8.09E-009	M1.7	600	N12E12	0.001
2012/05/10	00:10:00	360	4.294	0.774	-0.635	6.24E-008	1.41E-008	-1.46E-008	C1.4	360	N08E14	1.18
2012/05/12	04:38:11	13	4.028	1.306	-1.022	1.70E-008	7.83E-009	-7.43E-009	C1.3	420	N12W04	0.25
2012/05/13	08:10:44	104	6.541	1.493	-1.242	6.55E-009	4.86E-009	-3.02E-009	C7.0	3540	N08W24	2.05
2012/05/25	19:56:21	30	3.997	1.038	-0.87	1.98E-008	8.00E-009	-6.73E-009	C2.0	420	S12E80	0.44
2012/06/01	22:31:50	89	3.805	1.515	-1.055	9.23E-009	4.00E-009	-4.54E-009	C3.3	1920	N12W89	3.08
2012/06/06	19:59:52	367	4.021	0.503	-0.461	2.56E-008	6.19E-009	-5.99E-009	M2.1	540	S19W05	1.28

Date	Time	T_{90}	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2012/06/08	03:03:52	72	4.537	0.612	-0.53	4.37E-008	7.02E-009	-7.88E-009	C7.7	1860	S19W21	0.22
2012/06/09	16:49:04	157	4.42	0.547	-0.486	4.24E-008	5.90E-009	-6.30E-009	M1.8	660	S17E74	0.02
2012/06/29	01:21:39	119	4.279	0.638	-0.552	1.88E-008	4.07E-009	-3.83E-009	C6.7	600	N16E42	0.093
2012/06/29	04:13:21	14	4.818	0.837	-0.733	4.91E-008	1.46E-008	-1.50E-008	C4.6	420	S18E61	0.49
2012/06/30	18:30:36	67	4.241	0.808	-0.675	1.48E-008	3.73E-009	-4.96E-009	M1.6	480	N14E18	0.058
2012/07/01	19:14:23	121	4.254	0.669	-0.626	2.57E-008	4.98E-009	-6.12E-009	M2.8	600	N14E04	0.004
2012/07/02	10:47:41	71	4.476	0.326	-0.296	4.24E-007	5.29E-008	-8.91E-008	M5.6	840	S17E06	1.59
2012/07/02	20:01:41	298	5.385	0.527	-0.468	3.35E-008	5.26E-009	-5.55E-009	M3.8	298	S17E00	0.001
2012/07/03	17:00:36	123	3.133	0.441	-0.381	2.88E-008	4.57E-009	-4.48E-009	C9.0	660	S17W08	1.83
2012/07/03	15:21:45	110	4.425	0.708	-0.649	4.26E-008	8.33E-009	-8.19E-009	C4.1	300	S13W11	0.04
2012/07/04	22:06:08	98	4.491	0.349	-0.311	1.88E-007	2.88E-008	-2.67E-008	M4.6	720	S16W28	0.23
2012/07/05	02:40:23	69	3.79	0.551	-0.475	3.19E-008	7.89E-009	-6.26E-009	M2.2	720	S18W27	0.16
2012/07/05	10:46:42	60	4.558	0.448	-0.398	1.19E-007	2.20E-008	-1.92E-008	M1.8	2040	S19W30	0.25
2012/07/05	21:40:43	406	4.169	0.302	-0.278	1.05E-007	1.55E-008	-1.46E-008	M1.6	840	S12W46	3.102
2012/07/05	07:42:49	77	2.889	0.7599	-0.584	1.43E-008	4.13E-009	-2.43E-009	M1.3	480	S18W30	1.73
2012/07/05	09:19:01	50	3.412	0.866	-0.755	1.93E-008	6.16E-009	-5.97E-009	C5.8	420	S18W30	2.14
2012/07/06	13:29:26	82	4.843	0.731	-0.658	2.70E-008	7.41E-009	-5.72E-009	M1.2	1860	S20W45	0.004
2012/07/06	02:28:58	64	4.757	0.589	-0.518	5.14E-008	1.04E-008	-1.17E-008	C5.0	540	S11W50	0.681
2012/07/08	12:10:34	266	4.716	0.788	-0.692	1.24E-008	3.13E-009	-2.77E-009	M1.4	300	S17W60	1.68
2012/07/09	23:06:34	31	4.537	0.284	-0.255	1.88E-006	2.94E-007	-3.23E-007	M1.1	480	S17E38	0.774
2012/07/10	03:39:36	78	5.03	0.519	-0.445	1.48E-007	2.79E-008	-1.78E-008	C3.9	1320	S22E34	0.606
2012/07/14	04:52:43	155	4.649	0.585	-0.516	3.35E-008	5.99E-009	-6.59E-009	M1.0	840	S22W36	1.32
2012/08/06	00:42:07	70	4.468	0.387	-0.342	2.09E-007	2.66E-008	-3.04E-008	C9.4	540	S14E88	0.448
2012/08/06	08:13:17	57	5.227	0.723	-0.647	3.85E-008	8.67E-009	-9.49E-009	C6.3	660	S14E88	0.14
2012/08/07	03:12:51	55	4.913	1.055	-0.875	1.68E-008	6.27E-009	-5.12E-009	C2.0	900	S13E68	1.91
2012/08/17	17:13:14	189	4.013	0.451	-0.401	4.48E-008	9.52E-009	-6.48E-009	M1.0	1140	N19E87	0.869
2012/08/18	00:56:57	141	3.37	0.174	-0.158	3.72E-007	5.30E-008	-4.76E-008	M5.5	2580	N19E86	1.23
2012/08/18	23:17:42	210	3.444	0.54	-0.488	1.76E-008	3.47E-009	-1.88E-009	M1.3	1020	N21E76	0.73
2012/09/06	04:09:51	149	5.069	1.11	-0.935	1.09E-008	4.05E-009	-3.62E-009	M1.6	840	N04W61	1.57
2012/09/10	10:21:39	20	3.34	0.6	-0.531	5.49E-008	7.20E-009	-7.81E-009	C1.6	780	N16E22	0.064

Date	Time	T_{90} [s]	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2012/10/10	04:53:48	90	4.845	1.228	-1.012	1.01E-008	3.73E-009	-5.30E-009	M1.0	1740	S29E86	0.67
2012/10/11	08:02:10	38	5.735	0.774	-0.671	5.42E-008	1.36E-008	-1.43E-008	C4.6	600	N13E56	0.95
2012/11/12	23:23:00	192	3.762	0.506	-0.463	2.62E-008	5.40E-009	-5.60E-009	M2.0	1200	S25E47	0.861
2012/11/13	05:45:45	125	3.638	0.362	-0.317	6.52E-008	1.04E-008	-8.41E-009	M2.5	720	S26E44	1.5
2012/11/13	00:19:38	51	4.712	1.69	-1.19	7.93E-009	4.63E-009	-4.51E-009	C4.3	480	S25E47	0.94
2012/11/14	04:01:15	195	4.181	0.713	-0.675	1.94E-008	3.66E-009	-4.34E-009	M1.1	480	S23E27	0.12
2012/11/20	19:24:54	193	3.722	0.522	-0.465	2.24E-008	4.04E-009	-4.10E-009	M1.6	660	N07E15	3.2
2012/11/21	15:26:36	230	3.68	0.607	-0.525	1.71E-008	3.49E-009	-4.20E-009	M3.5	1680	N05E05	3.01
2012/11/24	13:36:43	69	3.795	0.505	-0.462	5.07E-008	8.54E-009	-7.76E-009	C3.3	660	N06W28	0.44
2012/11/27	15:55:45	60	2.655	0.13	-0.118	5.16E-007	6.68E-008	-5.17E-008	M1.6	660	N05W73	0.767
2012/11/28	21:32:04	153	4.256	0.694	-0.59	1.41E-008	3.45E-009	-3.39E-009	M2.2	1680	S14W57	0.01
2013/01/04	23:47:48	105	3.867	0.87	-0.71	1.34E-008	2.94E-009	-4.59E-009	C2.3	1980	N21E88	0.32
2013/01/05	09:29:01	19	5.792	1.116	-0.97	2.09E-008	-7.32E-009	-7.32E-009	M1.7	480	N20E88	0.02
2013/01/12	02:12:43	74	5.765	0.657	-0.558	5.06E-008	9.89E-009	-1.04E-008	C5.3	1800	N10E30	0.3
2013/01/12	19:29:55	56	6.083	1.024	-0.907	1.73E-008	6.62E-009	-5.78E-009	C3.9	720	N05E17	1.04
2013/01/13	08:36:21	135	4.683	0.412	-0.361	1.38E-007	2.23E-008	-1.87E-008	M1.7	300	N17W22	0.296
2013/01/13	00:48:21	39	3.925	0.321	-0.282	2.65E-007	4.50E-008	-4.70E-008	M1.0	420	N18W18	0.1
2013/01/18	04:42:35	480	4.354	0.794	-0.707	6.11E-008	1.17E-008	-1.33E-008	C1.7	480	N18W88	1.31
2013/02/05	08:14:19	57	4.831	0.757	-0.679	3.69E-008	8.64E-009	-1.16E-008	C6.3	600	N09E63	0.37
2013/02/06	00:08:45	77	4.163	0.953	-0.833	1.65E-008	6.53E-009	-4.90E-009	C8.7	2220	N22E19	0.001
2013/04/12	20:35:37	111	4.267	1.339	-1.048	7.26E-009	3.22E-009	-2.07E-009	M3.3	3240	N21W42	0.33
2013/04/24	00:18:53	146	2.943	0.602	-0.529	1.53E-008	3.43E-009	-3.28E-009	C1.4	360	N14W46	2.1
2013/04/29	19:28:35	124	3.625	0.715	-0.666	4.37E-007	6.16E-008	-6.63E-008	C4.0	600	S18W51	0.2
2013/05/02	20:44:01	39	4.516	0.769	-0.69	3.70E-008	8.29E-009	-9.27E-009	C2.8	480	S19E27	0.07
2013/05/03	17:29:51	263	4.303	0.786	-0.724	4.66E-008	8.34E-009	-8.60E-009	C2.8	1020	N16E81	2.43
2013/05/05	20:00:39	121	4.447	1.239	-0.947	1.06E-008	2.77E-009	-3.62E-009	C8.3	420	N11E45	3.54
2013/05/10	00:47:06	132	6.801	1.237	-1.134	1.16E-008	5.07E-009	-4.62E-009	M3.9	1440	N12E88	1.44
2013/05/12	22:39:04	189	4.751	1.311	-1.016	1.07E-008	4.90E-009	-3.93E-009	M1.2	900	N10E89	3.64
2013/07/02	17:46:58	69	5.307	0.597	-0.524	7.21E-008	1.67E-008	-1.53E-008	M1.5	420	S10E75	0.16
2013/07/03	07:04:15	139	3.626	0.726	-0.608	1.80E-008	4.38E-009	-3.70E-009	M1.5	1080	S11E82	2.01

Date	Time	T_{90} [s]	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2013/07/03	00:06:26	29	5.786	0.619	-0.539	1.24E-007	2.34E-008	-2.60E-008	C8.9	540	S10E55	0.007
2013/07/05	02:49:24	38	4.537	0.564	-0.483	7.32E-008	1.27E-008	-1.02E-008	C3.3	180	S14E58	0.22
2013/07/06	21:53:46	20	4.727	0.862	-0.759	4.12E-008	8.17E-009	-9.23E-009	C1.8	360	S09E07	0.26
2013/07/08	01:21:48	29	4.948	0.48	-0.425	2.65E-007	4.64E-008	-4.53E-008	C9.7	600	S07W03	1.49
2013/08/12	10:37:17	224	5.083	1.05	-0.734	1.43E-008	4.70E-009	-4.51E-009	M1.5	1560	S17E19	3.24
2013/08/17	19:10:50	22	3.744	0.851	-0.695	3.06E-008	7.30E-009	-6.99E-009	M1.4	3900	S05W30	0.22
2013/08/19	09:13:10	45	3.136	0.295	-0.26	1.62E-007	2.92E-008	-2.49E-008	C2.2	780	S27W85	0.681
2013/10/09	01:31:26	24	4.307	1.14	-0.843	2.97E-008	8.69E-009	-9.74E-009	M2.8	1980	S23E71	1.31
2013/10/11	07:08:40	530	3.073	0.347	-0.302	2.97E-008	3.54E-009	-5.28E-009	M1.5	2640	N21E87	1.19
2013/10/15	08:35:18	446	3.731	0.631	-0.542	1.31E-008	3.33E-009	-2.47E-009	M1.8	1320	S22W13	2.14
2013/10/15	05:05:25	79	5.422	0.568	-0.497	9.07E-008	1.74E-008	-1.50E-008	C9.5	360	S22W11	1.26
2013/10/18	05:06:41	26	3.96	0.921	-0.812	2.26E-008	6.10E-009	-6.02E-009	C5.3	720	N04E78	0.27
2013/10/25	02:53:24	297	4.383	0.574	-0.507	3.13E-008	5.68E-009	-5.90E-009	M2.9	1440	S07E76	1.27
2013/10/26	19:26:06	168	3.173	0.527	-0.724	2.81E-008	5.36E-009	-5.01E-009	M3.1	168	S09E81	0.15
2013/10/26	02:44:08	76	5.472	0.823	-0.724	2.37E-008	5.64E-009	-6.07E-009	C4.5	780	N09W44	0.03
2013/10/27	17:50:59	56	4.212	0.28	-0.25	4.82E-007	6.65E-008	-8.15E-008	C9.1	960	N06W70	1.03
2013/11/02	04:44:08	53	3.225	0.618	-0.504	2.87E-008	5.13E-009	-6.75E-009	C8.2	600	S23W04	1.12
2013/11/05	19:57:52	37	4.373	0.825	-0.679	2.93E-008	8.55E-009	-7.73E-009	C2.1	1140	S13E44	1.12
2013/11/06	01:21:47	222	4.472	1.366	-1.065	4.81E-009	1.56E-009	-2.08E-009	C4.4	600	S12E42	0.22
2013/11/06	11:49:20	49	4.572	1.098	-0.9227	1.50E-008	5.20E-009	-4.98E-009	C1.8	600	S11E35	0.37
2013/11/07	14:18:20	26	4.631	0.398	-0.343	3.30E-007	5.94E-008	-4.61E-008	M2.4	960	S13E23	0.797
2013/11/07	12:25:26	173	3.947	0.437	-0.415	3.31E-008	6.76E-009	-5.24E-009	C5.9	1620	S13E24	0.957
2013/11/08	18:25:12	50	2.493	1.638	-1.248	7.47E-009	3.48E-009	-3.63E-009	C1.1	660	N21W55	0.23
2013/11/11	00:44:33	207	5.777	0.904	-0.804	1.20E-008	3.21E-009	-3.03E-009	C7.8	480	S13W24	0.01
2013/11/11	16:58:50	28	4.473	1.088	-0.872	1.64E-008	5.18E-009	-5.67E-009	C1.4	540	S15W35	0.37
2013/11/14	06:45:17	29	5.308	0.544	-0.471	1.87E-007	4.18E-008	-2.99E-008	C3.5	420	N07E65	0.671
2013/11/15	11:33:32	56	5.349	0.785	-0.683	3.64E-008	8.86E-009	-9.30E-009	C7.5	540	S18E20	1.74
2013/11/16	07:48:50	53	3.71	0.697	-0.564	3.08E-008	6.68E-009	-6.53E-009	M1.6	480	S19W29	0.884
2013/11/23	08:44:50	32	3.044	0.436	-0.379	8.42E-008	1.35E-008	-1.56E-008	C1.9	300	N12W89	0.05
2013/12/22	15:11:51	33	3.301	0.3043	-0.269	1.34E-007	2.34E-008	-2.10E-008	M3.3	2880	S19W56	0.941
2013/12/22	08:35:05	23	2.87	0.391	-0.3411	1.19E-007	2.15E-008	-2.71E-008	M1.1	480	S17W52	0.585

Date	Time	T_{90} [s]	Photon index	Err +	Err -	flux [erg/s/cm ²]	Err +	Err -	GOES	GOES TIME [s]	Loc	χ^2/dof
2013/12/23	17:26:41	90	4.428	0.924	-0.812	1.35E-008	4.32E-009	-3.18E-009	C8.4	480	S19E80	0.14
2013/12/29	07:52:49	144	5.883	0.858	-0.759	2.19E-008	3.99E-009	-6.62E-009	M3.1	660	S18E01	0.1
2014/01/04	10:19:32	117	5.481	0.534	-0.48	1.13E-007	1.83E-008	-1.98E-008	M1.3	1500	S05E48	2.001
2014/01/07	03:50:44	52	4.996	0.829	-0.704	3.52E-008	9.49E-009	-8.00E-009	M1.0	420	N07E08	0.796
2014/01/08	03:44:14	300	3.52	0.592	-0.583	2.97E-008	6.31E-009	-7.34E-009	M3.6	900	N11W81	1.85
2014/01/08	03:06:37	34	4.861	1.365	-1.09	1.88E-008	6.74E-009	-7.64E-009	C3.1	960	S10E01	2.07
2014/02/16	09:24:01	195	3.8	0.301	-0.269	1.42E-007	2.04E-008	-2.84E-008	M1.1	540	S11E01	0.384
2014/02/16	13:50:57	30	4.698	0.617	-0.525	6.30E-008	1.12E-008	-1.30E-008	C3.4	1020	S10W01	0.32
2014/02/20	07:44:24	464	4.531	0.447	-0.398	1.18E-007	2.26E-008	-1.60E-008	M3.0	3540	S15W73	1.07
2014/03/05	02:07:06	211	4.374	0.862	-0.762	1.44E-008	4.17E-009	-3.21E-009	M1.0	360	S27W08	0.25
2014/03/05	04:29:15	74	1.993	0.842	-0.783	1.54E-008	3.38E-009	-3.84E-009	C1.8	3180	S28W09	0.19
2014/03/11	03:47:07	193	4.494	0.776	-0.696	1.58E-008	3.56E-009	-3.36E-009	M3.5	2700	N13W55	0.31
2014/03/28	23:46:05	19	4.433	0.856	-0.756	3.72E-008	8.28E-009	-1.08E-008	M2.6	840	N10W22	0.01
2014/03/30	21:12:33	141	4.071	0.963	-0.794	1.13E-008	3.54E-009	-3.35E-009	C7.6	420	N10W47	2.82
2014/04/02	18:17:46	48	3.688	0.613	-0.539	4.13E-008	7.50E-009	-7.35E-009	C5.3	300	N09E60	0.36
2014/04/11	11:20:15	109	5.041	0.633	-0.554	3.63E-008	7.61E-009	-7.62E-009	C8.4	900	S18E84	0.34
2014/06/14	19:26:24	165	4.43	0.811	-0.721	1.80E-008	5.10E-009	-4.67E-009	M1.4	660	S10E89	0.3
2014/08/25	20:11:20	173	5.158	0.5311	-0.479	4.55E-008	7.27E-009	-9.28E-009	M3.9	1380	N07W43	0.78
2014/10/16	13:01:20	44	3.775	0.192	-0.173	2.15E-006	3.63E-007	-4.13E-007	M4.3			0.648
2014/10/21	10:48:31	36	4.006	0.4	-0.353	1.60E-007	2.17E-008	-2.98E-008	C6.3			0.448
2014/10/21	12:27:00	33	3.145	0.179	-0.162	6.94E-007	1.12E-007	-7.17E-008	C4.4	300	S18E36	1.187
2014/11/28	04:21:33	23	4.857	0.969	-0.85	3.01E-008	7.32E-009	-8.24E-009	C2.9	360	S21E55	0.03

Acknowledgment

本修士論文を執筆にするあたり、ご協力くださった方々に心から感謝申し上げます。特に田代信教授、寺田幸功准教授には、大変お世話になりました。毎回の MTG、昼食などの度に頂いたコメントは、なかなか物理が見えずに迷走していた私にとって、とても助かるものでした。また、学会の度に発表練習を見ていただいたり、発表資料や概要、集録などを添削して頂きました。毎回、練習や添削の前後で別物が出来上がっていましたが、根気よく指導して頂いたおかげで、少しずつまとまなものが作れるようになったかなと思います。松山の居酒屋で飲みながら発表練習したのもいい思い出です。3 年間のご指導本当にありがとうございました。今後は仕事で関わることもあるかもしれませんが、その際にはまたよろしく願います。安田さんには研究のことはもちろん、それ以外のこともたくさん教えてもらいました。なんでも相談に乗ってくれるその姿は自分にとって理想の先輩です。本当にありがとうございました。また、一つ上の先輩方にも仲良くしてもらいました。M1,M2 でいった夏の学校は、とても楽しかったですね。運営の年ということもあり、身内で固まりすぎたために外部の友達があまりできなかったことと引き換えに、とても仲良くなれたと思います。そして、内部進学が自分 1 人だったため、他大から来た八重幡くんと加藤さんの二人の存在はとてもありがたかったです。特に加藤さんは同じ 5 階ということもありよく話しました。よくというか、自分の大学院生活での同い年との会話頻度分布は 2 人の加藤で 3 σ 満たしてそうです。とりあえず最初のカメラは Canon で買うつもりなのでよろしくね。これからも時々飲みましょう。WAM チームということで、小高くん、横山くんとは一緒に天体解析を行いました。小高くんには解析を指導しましたが、自分で色々調べていくので、全然手がかかりませんでした。来年は WAM の解析を引っ張ってってください。そして、残りの GRB の解析も頑張ってください。横山くんは自分の解析を文句ひとつ言わず手伝ってくれてました。また、自分にとっては貴重な同期の友達でもありました。色々ありがとう。これからも飲みに行きましょう。

この 3 年間はあっという間でしたが、物理の面白さ、難しさ、奥深さを学ぶことができ、本当に楽しい時間でした。夢であった宇宙の研究をこの研究室ですることができたことは自分にとって幸運でした。3 年間かけてやっとですが、X 線天文学の入口くらいには立てたかなと思います。また、人工衛星の開発にも最後の最後で少しだけ関わることができ、種子島で「ひとみ」が空高く昇ってく様子を見たときの感動は今でも鮮明に覚えています。そして、これからも忘れないでしょう。みなさま、ありがとうございました。最後になりましたが、ここまで育ててくださり、大学院まで進学させてくれた家族に感謝の意を表して謝辞と致します。

平成 29 年 2 月 6 日 矢部 聖也

Reference

- Ahluwalia, H. S., & Ygbuhay, R. C. 2016, *Solphys*, 291, 3807
- Aptekar, R. L., Frederiks, D. D., Golenetskii, S. V., et al. 1995, *Space Science Reviews*, 71, 265
- Bohlin, J. D., Frost, K. J., Burr, P. T., Guha, A. K., & Withbroe, G. L. 1980, *Solphys*, 65, 5
- Brown, J. C. 1971, *SoPh*, 18, 489
- Brown, J. C., & Hoyng, P. 1975, *Apj*, 200, 734
- Carmichael, H. 1964, *NASA Special Publication*, 50, 451
- Carrington, R. C. 1859, *MNRAS*, 20, 13
- De Pontieu, B., Title, A. M., Lemen, J. R., et al. 2014, *Solphys*, 289, 2733
- Dennis, B. R., & Zarro, D. M. 1993, *Sol. Phys.*, 146, 177
- Domingo, V., Fleck, B., & Poland, A. I. 1995, *Solphys*, 162, 1 1993, *Solphys*, 146, 177
- Endo, A., Minoshima, T., Morigami, K., et al. 2010, *PASJ*, 62, 1341
- Frost, K. J., & Dennis, B. R. 1971, *Apj*, 165, 655
- Garcia, H. A. 1994, *Soph*, 154, 275
- Gehrels, N., Chincarini, G., Giommi, P., et al. 2004, *Astrophysical Journal*, 611, 1005
- Grigis, P. C., & Benz, A. O. 2004, *Aap*, 426, 1093
- Grigis, P. C., & Benz, A. O. 2006, *Aap*, 458, 641
- Hale, G. E. 1908, *Apj*, 28, 315
- Hale, G. E., Ellerman, F., Nicholson, S. B., & Joy, A. H. 1919, *apj*, 49, 153
- Handy, B. N., Acton, L. W., Kankelborg, C. C., et al. 1999, *Solphys*, 187, 229
- Hey, J. S. 1983, *Oxford, Pergamon Press*, 1983, 253 p.,
- Hirayama, T. 1974, *Solphys*, 34, 323
- Hudson, H., & Ryan, J. 1995, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 33, 239

- Ishikawa, S., Krucker, S., Takahashi, T., & Lin, R. P. 2011, *Apj*, 737, 48
- Kane, S. R., & Anderson, K. A. 1970, *Apj*, 162, 1003
- Kane, S. R. 1974, *BAAS*, 6, 289
- Kane, R. P. 2002, *Solphys*, 205, 383
- Kelley, R. L., Mitsuda, K., Allen, C. A., et al. 2007, *PASJ*, 59, 77
- Kiplinger, A. L. 1995, *Apj*, 453, 973
- Kondo, I. 1982, *Solar Flares*,
- Kopp, R. A., & Pneuman, G. W. 1976, *Solphys*, 50, 85
- Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., et al. 2007, *Solphys*, 243, 3
- Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. 2007, *PASJ*, 59, 23
- Lin, R. P., Dennis, B. R., Hurford, G. J., et al. 2002, *Solphys*, 210, 3
- Masuda, S., Kosugi, T., Hara, H., Tsuneta, S., & Ogawara, Y. 1994, *Nature*, 371, 495
- Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, *PASJ*, 59, 1
- Morigami, K., 2009, *Saitama University, Master thesis*.
- Neupert, W. M. 1968, *apjl*, 153, L59
- Nozawa, S., Itoh, N., & Kohyama, Y. 1998, *Apj*, 507, 530
- Ogawara, Y., Takano, T., Kato, T., et al. 1991, *Solar Phys*, 136, 1
- Ohno, M., Fukazawa, Y., Yamaoka, K., et al. 2005, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52, 2758
- Parker, E. N. 1955, *Apj*, 122, 293
- Parker, E. N. 1957, *JGR*, 62, 509
- Parks, G. K., & Winckler, J. R. 1969, *Apjl*, 155, L117
- Petschek, H. E. 1964, NASA Special Publication, 50, 425
- Peterson, L. E., & Winckler, J. R. 1959, *JGR*, 64, 697
- Sato, T. 1979, *JGR*, 84, 7177
- Shibata, K., Masuda, S., Shimojo, M., et al. 1995, *Apjl*, 451, L83
- Shibata, K., & Magara, T. 2011, *Living Reviews in Solar Physics*, 8, 6

- Somov, B. V., & Kosugi, T. 1997, *Apj*, 485, 859
- Sturrock, P. A. 1966, *Nature* 211, 695
- Sweet, P. A. 1958, *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*, 6, 123
- Takahashi, T., Abe, K., Endo, M., et al. 2007, *PASJ*, 59, 35
- Tanaka, Y. 1983, *Solphys*, 86, 3
- Terada, Y., Watanabe, S., Ohno, M., et al. 2005, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 52, 902
- Tripathi, S. C., Khan, P. A., Aslam, A. M., et al. 2013, *Apss*, 347, 227
- Ugai, M., & Tsuda, T. 1977, *Journal of Plasma Physics*, 17, 337
- Tsuneta, S., Hara, H., Shimizu, T., et al. 1992, *PASJ*, 44, L63
- Wolf, R. 1850, *Astronomische Mitteilungen der Eidgenössischen Sternwarte Zurich*, 1, 3
- Yamaoka, K., Endo, A., Enoto, T., et al. 2009, *PASJ*, 61, 35
- Zharkova, V. V., & Gordovskyy, M. 2006, *Apj*, 651, 553