

X線天文衛星すざく搭載XISを用いた
地球超高層大気解析の検討

埼玉大学大学院理工学研究科
物理機能系専攻物理学コース
田代寺田佐藤勝田研究室 森田佳恵

2018年2月5日

概要

超高層大気は、成層圏より上の高度 80- 1000 km に広がる最も上層の地球大気圏を指す。この領域は太陽からの荷電粒子の入射や紫外線・X線放射を強く受けており、窒素および酸素が分子や電離状態で存在している。しかし、観測の難しい高度であるため、直接観測による組成比の観測報告はまだ少ないのが現状である。そこで我々はX線天文衛星「すざく」が地球方向を観測しているデータに着目し、地球超高層大気を構成する元素比を定量的に評価することを試みた。

「すざく」のX線 CCD カメラ (XIS) は低地球軌道 (地上高度約 550 km) を三次元空間固定姿勢で周回しているため、観測データには地球方向を観測している時間も多く含まれる。また、XIS は 1 keV 以下のエネルギー帯域で高い輝線感度をもち、エネルギー分光能力は 0.4 keV で 40 eV である。地球大気の子な構成元素である窒素と酸素は原子状態で約 390 eV と 525 eV、分子状態で約 386- 409 eV と 519- 544 eV の特性X線 (輝線) を放出することが知られている。CCD の分光能力では、それぞれの元素の原子と分子状態からの輝線を分離して検出することは難しいが、窒素と酸素の輝線を分離して検出することはできる。我々は衛星が太陽に照らされた (昼の) 地球を指向している時の観測データを取り出し、バックグラウンドとして夜の地球方向を観測しているデータを差し引くことで、日照大気からのX線スペクトルを得た。その結果、窒素や酸素起源の輝線がはっきりと見られ、それぞれの輝線幅は単一の原子状態輝線から期待される輝線幅よりも明らかに広いことが分かった。観測された窒素や酸素輝線の中心エネルギーと広がり、窒素原子及び分子からの 1 本、酸素原子及び分子からの 1 本の輝線としてガウシアンモデルで非常によく再現することができた。今回の観測帯域は低エネルギーかつ非常に明るい領域であるため、XIS の観測データ校正の不定性の影響による輝線幅の広がりも慎重に検討した。すなわち、XIS への可視光の混入や電荷転送による影響も詳細に検討し、不定性は観測された輝線幅よりも十分に小さいことを確認した。よって、輝線幅の広がり、は地球超高層大気に含まれる窒素、酸素の分子や原子の混合気体からの放射と考えることができる。これは超高層大気に存在する分子・原子状態を初めてX線観測を用いて示した結果である。「すざく」のX線スペクトルから得られた窒素と酸素の存在比を NASA のデータベースに示されている大気組成比モデルと比較すると、おおむね一致していた。本修論によって、X線天文衛星を用いた地球大気観測は超高層大気の新たな観測手段となり得ることを示した。

目次

第1章	序論	5
1.1	地球超高層大気	5
1.1.1	大気の構造とエネルギー源	6
1.2	X線と物質の相互作用	9
1.2.1	光電吸収	9
1.2.2	Compton 散乱	11
第2章	XIS	12
2.1	X線 CCD カメラ	13
2.1.1	表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD	14
2.1.2	電荷転送の方式と読出し	16
2.1.3	性能劣化の原因	17
2.2	XIS の性能	19
2.2.1	可視光保護フィルター	19
2.2.2	電荷注入機能 (Spaced-Row Charge Injection : SCI)	19
2.2.3	ゲイン・較正線源	20
2.2.4	エネルギー分解能	20
2.3	補正	21
2.3.1	ダークレベル補正	21
2.3.2	光漏れ量補正	22
第3章	超高層大気の観測および解析	23
3.1	用いたデータ	23
3.2	データリダクション	24
3.2.1	バックグラウンド	25
3.2.2	レスポンスの作成	25
3.3	スペクトル解析	26
第4章	較正の評価	29
4.1	電荷転送効率の評価	29
4.1.1	電荷転送効率の評価方法	29
4.1.2	電荷転送効率の評価結果	31
4.2	光漏れ量補正による評価	33

4.2.1	光漏れ量補正の方法	34
4.2.2	光漏れ量補正の結果	35
4.2.3	光漏れ量揺らぎによるスペクトルの評価	36
第5章	議論	40
5.1	酸素・窒素比の検討	40
5.2	原子・分子比の検討	44
第6章	まとめ	47

目 次

1.1	各波長の大気の進行距離	6
1.2	地球大気温度の鉛直分布と各大気領域の名称	8
1.3	Compton 散乱	11
2.1	「すぎく」衛星の概観	12
2.2	XIS の概観と座標系	13
2.3	CCD の構造図	15
2.4	表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD の検出効率	15
2.5	Frame Transfer 方式の模式図 [6]	16
2.6	3相クロックによる電荷転送の模式図 [5]	16
2.7	衛星打ち上げ後の ^{55}Fe ラインのピークと幅の変化	20
3.1	「すぎく」が地球大気を観測するイメージ	23
3.2	昼地球大気から得られたスペクトル	26
3.3	ベストフィットの昼地球大気のスペクトル (a)	27
3.4	昼地球大気のスペクトル (b)	28
4.1	XIS を用いた地球大気の観測時の画像の例	30
4.2	観測領域を分割した際のスペクトル	31
4.3	2005 年 9 月 9 日の光漏れ量の変動	33
4.4	$L(n) - L(n - 1)$ の時間変動	34
4.5	$L(n) - L(n - 1)$ の時間変動の拡大図	35
4.6	2005 年 11 月 2 日の光漏れ量の変動	36
4.7	2005 年 11 月 2 日の光漏れ量の変動 (11000- 17000 sec)	37
4.8	各観測期間の光漏れ量の揺らぎ	38
4.9	観測期間 1 と観測期間 5 の昼地球のベストフィットのスペクトル	39
5.1	1つのスペクトルに2つのガウシアンを用いた場合のベストフィットのスペクトル (c)	41
5.2	各条件でフィッティングをおこなった際のベストフィットのスペクトル (d)(e)(f)(g)	45

表 目 次

1.1	窒素および酸素の特性 X 線の文献値	10
2.1	XIS の主要緒元	14
3.1	解析に用いたデータ	24
3.2	地球大気 of ベストフィットパラメータ (a)	27
3.3	地球大気 of ベストフィットパラメータ (b)	28
4.1	観測領域を分割した際のベストフィットパラメータ	32
4.2	各領域の $E_{Line_{NorO}}/E_{tail_{NorO}}$	32
4.3	観測期間 1 と観測期間 5 の昼地球のベストフィットのパラメータ	38
5.1	1 つのスペクトルに 2 つのガウシアンを用いた場合のベストフィットのパラメータ (c)	42
5.2	NRLMSISE-00 Atmosphere Model より求めた窒素・酸素比とそれぞれの原子・分子比	43
5.3	各条件でフィッティングをおこなった際のベストフィットのパラメータ (d)(e)(f)(g)	46
5.4	(e)(f)(g) の条件でフィッティングをおこなった際の原子/分子比	46

第1章 序論

1.1 地球超高層大気

超高層大気とは成層圏より上の高度 80- 1000km に広がる最も上層の大気圏のことを指す。この領域では太陽から飛来する荷電粒子や紫外線・X線放射を吸収し、熱入力や光分解によって低層とは異なった電離状態の原子、分子、化合物があると考えられている。その化学平衡は宇宙線や太陽放射強度によって変化すると考えられ、対流圏の気候変動にも間接的に影響する可能性がある。

太陽由来の荷電粒子、紫外線、X線の放射強度は太陽活動によって大きく変動することが知られており、それが超高層大気の化学的な状態に影響を及ぼしていると考えられる。しかし、この領域は観測の難しい高度であるため、その場での観測あるいは電磁放射などによる観測の報告はまだ少ない。本論文ではX線天文衛星による大気圏外からの超高層大気のX線観測の検討を行うが、それに先立って、ここでは地球大気の構造と性質について述べる。

1.1.1 大気の構造とエネルギー源

地球大気的主要なエネルギー源は太陽からの電磁放射あるいは粒子放射である。太陽の電磁放射はガンマ線から電波までの広範囲なスペクトル帯に及ぶ。

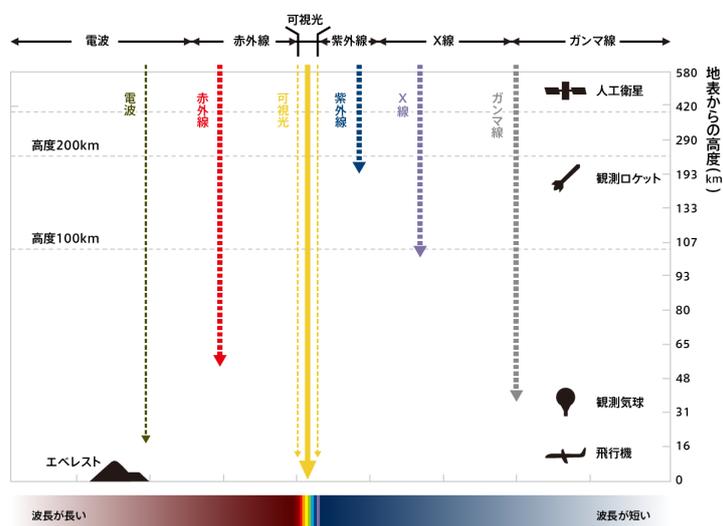


図 1.1: 各波長の大気の進行距離 [9]

太陽から大気へのエネルギー入射を、大気の鉛直構造にしたがって見ていく。

対流圏

地表に最も近く、ほとんどの気象現象が起きている領域である。この領域は高度が上昇すると共に気温が下降し、最低気温が現れた面を対流圏界面とよぶ。対流圏界面の高度は対流圏の平均気温が低い高緯度地方で低く、平均気温の高い低緯度地方で高くなる。

この領域に到達する太陽エネルギーは可視光である。可視光は大気にほとんど吸収されずに地表に到達し、吸収されて地表を温める。温められた地表は赤外線を放射し、一部は大気中の水蒸気や二酸化炭素に吸収され、残りは宇宙空間に放出される。

成層圏

対流圏界面高度から約 50 km までの大気層を指し、この領域は高度と共に気温が上昇する。成層圏の気温はオゾンと酸素による太陽紫外放射エネルギーの吸収と、二酸化炭素、水蒸気およびオゾンの赤外放射によって定まる。また、この領域はオゾン密度が極大になる領域(オゾン層)を含む領域であり、その高度は 25km

付近である。

よく知られているように、紫外線はオゾン層の生成に強く関係している。大気中の酸素分子が紫外線を吸収し、光分解されると2つの酸素原子になる。この酸素原子が酸素分子と反応してオゾンが形成される。この反応は紫外線の吸収による光分解や、酸素原子との再結合によって酸素分子に戻る反応との、光化学平衡にある。

中間圏

成層圏よりさらに上層の高度 50- 80km の領域を中間圏とよぶ。この領域は酸素分子による太陽紫外線の吸収と二酸化炭素分子の赤外放射によって気温が定まるが、プラネタリー波¹や大気重力波²といった惑星規模の気象変動も起きている領域であるため、これらも考慮する必要がある。

熱圏

中間圏界面約 80 km から上層の領域を指し、地球大気の主要な電離圏を含む。この領域は高度とともに気温も急激に上昇し、高度 200 km においては 500- 1200 K に達する。この気温の上昇は窒素、酸素原子が紫外線や X 線などによる光電離の際に電磁波を吸収するためである。

太陽 X 線は熱圏で吸収され、電離圏の生成に重要な役割を果たす。太陽 X 線の発生機構はいくつかある。1つは熱電子による原子、イオンの励起によるものであり、それらの連続および不連続電子状態間の遷移に対応して特性 X 線や連続スペクトルを発生する。もう1つは非熱的な電子から発生するものであり、電子のシンクロトロン放射や制動放射によるものである。

太陽 X 線強度は太陽活動に著しく影響される。その変動幅は波長域によって異なるが短波長側で最も大きく、太陽活動極大期には静常時の 10- 1000 倍の増加が観測される。

電離層

電離層は電子密度の違いによって下層から順に D、E、F 層と名付けられている。それぞれの高度は図 1.2 に示されている。上層に行くほど強い紫外線や X 線を受けるので電離が進み、電子密度が高くなる。ゆえに夜は太陽からの放射を受けないため、電子密度が小さくなり、下層の D 層は消滅する。

¹偏西風の周期的変動が惑星規模の波動。その波長は 1 万 km を超える。

²密度が違う界面で起きる、大気の上方向の振動。

太陽の粒子放射

電磁放射について重要なエネルギー源が荷電粒子放射である。中でも宇宙線は高エネルギーであり、0.1- 10 GeV 以上のエネルギーを持って大気に突入してくる。この高エネルギーの宇宙線は遠い銀河系空間に起源を持つ。一方、低エネルギーの宇宙線が大規模な太陽フレアにともなって異常増加する現象が稀におこる。これは太陽フレア領域の磁気プラズマ中の粒子加速によって生じるエネルギー粒子であるので、太陽宇宙線と呼ばれている。

さきほど述べたように、宇宙線は遠い銀河系空間に起源を持つが、地表近くで観測されるもののほとんどは地球大気分子との衝突によって生成された2次宇宙線(中性子、中間子、ガンマ線など)である。1次宇宙線の組成は陽子が90%、 α 粒子が9%、その他が1%で構成されていることが分かっている。

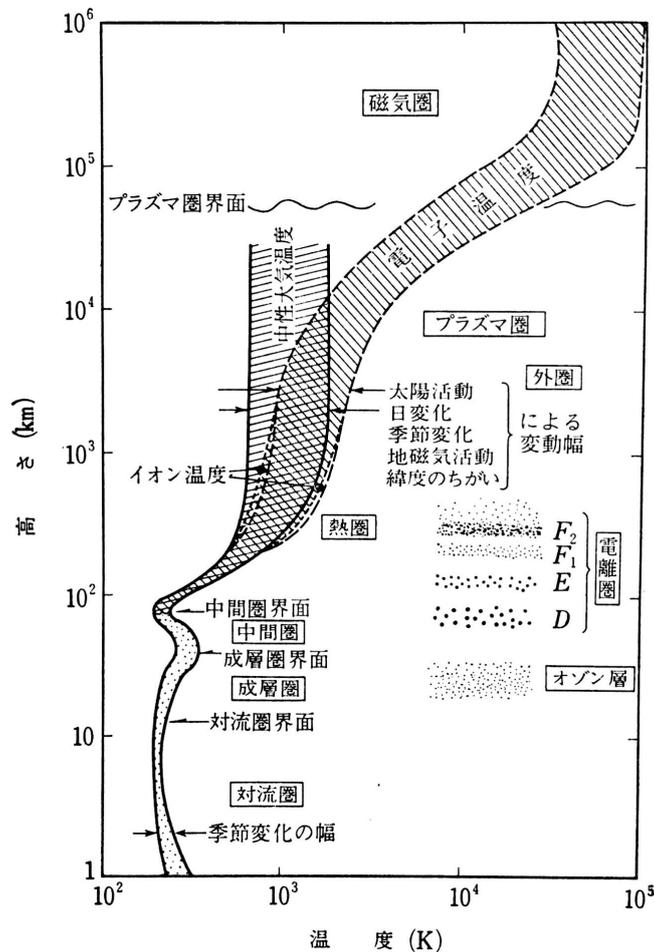


図 1.2: 地球大気温度の鉛直分布と各大気領域の名称 [1]。地球大気は地表面から上層に向かう温度変化に応じて分割した領域で定義されている。

大気の鉛直構造のうち、熱圏以上の領域を地球超高層大気と総称する。前述したように、この領域はとくに太陽活動による変動幅が大きな紫外線、X線によるエネルギー入力を受けている領域である。特に太陽X線による大気の状態変化は地表からの直接的な観測ができず、大気圏外からの観測が期待される。

1.2 X線と物質の相互作用

1.1章では特に紫外線・X線による地球超高層大気へのエネルギー入射の概要をみた。ここでは、その物理素過程である光電吸収とCompton散乱についてまとめておく。

1.2.1 光電吸収

光電吸収とは、入射光子のエネルギーが原子によって吸収され、原子中の電子が外に飛び出す現象である。この現象は原子核に束縛された電子によるものであり、自由電子による吸収は起こらない。エネルギーと運動量の保存則が成立するためには、運動量のやりとりをするための第三の物体（原子核）が存在する必要がある。入射光子のエネルギーを E_X 、K,L,M, … 殻の結合エネルギーを E_b とすると、放出される電子のエネルギー E_e は

$$E_e = E_X - E_b \quad (1.1)$$

と表される。入射エネルギーがK殻の結合エネルギーよりも大きなエネルギーを持つ光子に対しては、80%以上がK殻電子による吸収となる。逆に小さい場合、L殻電子による吸収となる。

光電子を放出すると殻に空孔ができるが、直ちに自由電子の捕獲や原子内の他の殻の電子の再配列によって満たされる。初期状態と最終状態のエネルギー差はAuger電子または特性X線の放射によって解釈される。

Auger 電子

光電子の放出などによって内殻の一部が空になると、原子の励起エネルギーが直接外殻電子1個に付与され、その電子が原子から放出されることがある。この電子をAuger電子という。Auger電子が持つエネルギーは原子の最初の励起エネルギーと電子が放出された殻の結合エネルギーの差である。

特性 X 線

原子が励起状態から基底状態へエネルギー準位を遷移する際、そのエネルギーの差分が光子として放射される。特に内殻電子の場合、そのエネルギー差は X 線光子に相当するので、この X 線を特性 X 線という。もし K 殻に 1 個の空孔ができたとすると、この空孔を埋めるために外殻から電子が来る。その時、空孔を埋める電子が L 殻から来る場合は K 殻と L 殻のエネルギー差に等しいエネルギーを持つ K_{α} 線が放射される。M 殻から電子が来る場合には、よりエネルギーの大きな K_{β} 線は放射される。K 殻の空孔を埋めるために生じた外殻の空孔は、さらに外殻の殻の電子によって順々に満たされていき、それぞれ L, M, ... 系列の特性 X 線を放射する。

地球大気の観測で期待される特性 X 線は窒素と酸素の原子および分子からの輝線である。その文献値を表 1.1 にまとめておく。分子の場合、原子に比べて電子のエネルギー準位が複雑であるため、複数の特性 X 線を放射する。

表 1.1: 窒素および酸素の特性 X 線の文献値 [12][15]

	N[eV]	O[eV]
原子	392.4	524.9
分子 $2g$	386.6	519.2
分子 $2u$	405.6	534.2
分子 $3g$	409.5	544.1

1.2.2 Compton 散乱

Compton 散乱とは自由電子によって光子が弾性散乱される場合、または光子のエネルギーが電子の結合エネルギーと比較して十分大きく、電子を自由電子とみなせるようになった場合、光子が電子により非弾性散乱を受けることをいう。散乱角を θ とすると、散乱光子のエネルギー E_X' は

$$E_X' = \frac{E_X}{1 + (E_X/mc^2)(1 - \cos\theta)} \quad (1.2)$$

ここで、 m は電子の静止質量である。また反跳電子のエネルギー E_e は反跳角を ϕ とすると以下のようになる。

$$E_e = E_X - E_X' \quad (1.3)$$

$$= E_X \frac{(E_X/mc^2)(1 - \cos\theta)}{1 + (E_X/mc^2)(1 - \cos\theta)} \quad (1.4)$$

電子1個当たりの散乱全断面積は Klein・仁科の公式によって与えられる。また、光子のエネルギーが低くなると、Compton 散乱の散乱断面積はトムソン散乱の断面積になることが知られている。一方、光子のエネルギーが高くなると散乱断面積は減少するが、これは電磁波の振動数が高くなり、電子散乱における相対論的効果が無視できなくなったためである。

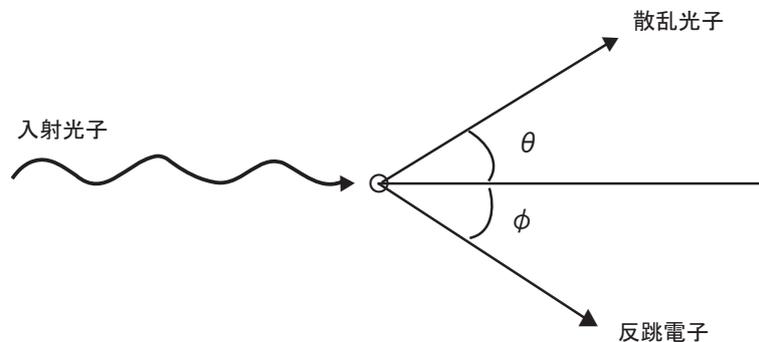


図 1.3: Compton 散乱

第2章 XIS

X線天文衛星「すざく」は2005年7月10日に打ち上げられた日本で5番目のX線天文衛星である。高度約550 kmを飛行しており、1日に地球の周りを約15周する。したがって、「すざく」の天体観測データには地球を観測したデータも含まれる。約10年にわたり運用も行われており、長期観測にも適していると考えられる。

「すざく」にはX線反射望遠鏡 (X-ray Telescope: XRT) が5台、その焦点面に4台のX線 CCDカメラ (X-ray Imaging Spectrometer: XIS) とX線マイクロカロリメータ (X-ray Spectrometer: XRT) が搭載されている。さらに、非撮像型であるが硬X線帯域 (10- 600 keV) を観測できる硬X線検出器 (Hard X-ray Detector: HXD) が1台搭載されている。本研究ではXISを用いる。

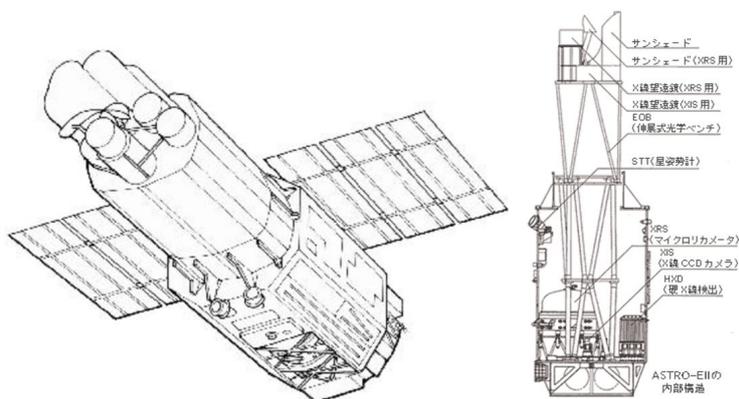


図 2.1: 「すざく」衛星の概観 [7]

「すざく」の軟X線検出器は4台のX線 CCDカメラで構成されており、それぞれXIS0、XIS1、XIS2、XIS3と呼ぶ。本章ではXISの構造と性能について説明する。

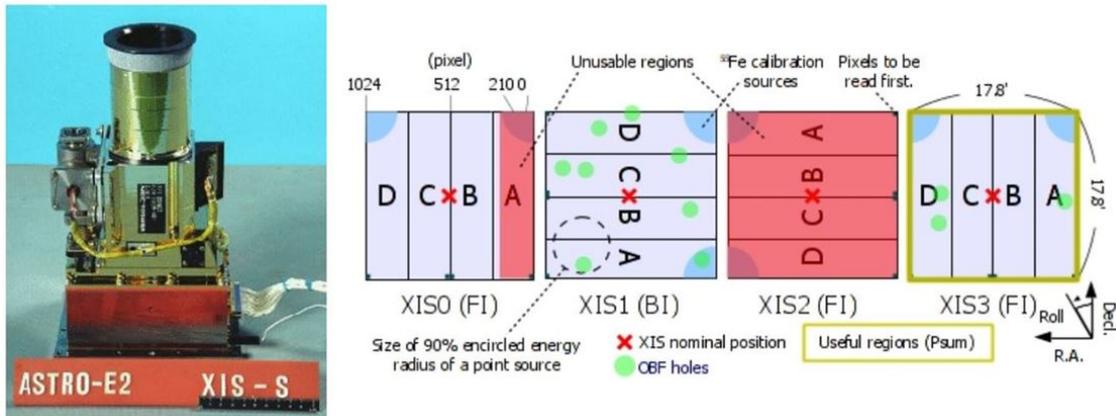


図 2.2: 左 : XIS の概観。右 : XIS の座標系と校正線源の位置。XIS はそれぞれ 4 つのセグメント A,B,C,D に分けられている。濃い水色の領域が校正線源 ^{55}Fe が照射される領域であり、緑色の丸は 2013 年 7 月までに確認されている微小隕石によって空いた可視光保護フィルタの穴の位置である。[10]

2.1 X線 CCD カメラ

CCD とは Charge Coupled Device(電荷結合素子) の略であり、半導体を用いた撮像素子である。1 つのチップに数~数十 μm 四方の画素を数百万個並べることによって構成されている。CCD のある画素に X 線が入射すると、光電吸収が起こって光電子が生じる。生じた光電子はエネルギーを失うまで Si 原子と衝突を繰り返し、電子・正孔対を作る。生じた電子・正孔対数は入射した X 線のエネルギーにおおよそ比例し、画素ごとに集められて電荷読出し口へ向かって画素間をバケツリレーのように転送される。読出し口は通常、チップの端にあるため、大量の画素を少数の読出し回路で読出し、結果として撮像することができる。このように生じた電子の集まり(電子雲)を正確に検出することで入射 X 線光子のエネルギーを測定することができる。

X 線 CCD 検出器は金属(Metal)の電極、酸化物(Oxide)の絶縁層、半導体(Semiconductor)の 3 層を順に接続した構造をしており、これを MOS 構造という。通常、半導体部分には Si が用いられる。これは Si の表面を酸化性の外気に触れさせることで安定した酸化膜を容易に形成されるからである。「すざく」に搭載されている XIS では、この上に金属層として金属と同じ原理を持ち、透明であるポリシリコンを堆積させている。

表 2.1: XIS の主要緒元

構造	Frame Transfer 型
ピクセル数	1024(横) × 1024(縦)(撮像領域)
ピクセルサイズ	24 μ m × 24 μ m (撮像領域)
クロック	3 相方式
読出し口	4 個
読出しノイズ	$< 3e^-$
視野	18' × 18'
時間分解能	8sec(Normal Mode)
エネルギー分解能	2 % (@6 keV)
エネルギー領域	0.2- 12 keV
動作温度	-90 °C
較正用線源	^{55}Fe

2.1.1 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD

図 2.2 に示したように、CCD には表面照射型 (Front-Illuminated, FI) と裏面照射型 (Back-Illuminated, BI) の 2 種類がある。前者は電極側を受光面とし、後者はその反対側を受光面とする。XIS0、XIS2、XIS3 は FI、XIS1 は BI である。

表面照射型

電極側から X 線を受光するため、発生した電荷が電極へ向かう際に通る Si 結晶による拡散や再結合の効果が小さい。ゆえにエネルギー分解能に優れる。しかし、低エネルギーの X 線にとっては受光面の電極層や絶縁層が遮蔽物となるため検出効率は低くなる。また、一般的に電極の反対側に不感領域である中性層が残り、この部分で X 線が吸収されると非常に大きな拡散・再結合を受けてしまう。このような X 線は大きく広がったイベントとして検出されるので、解析の際には排除する必要がある。

裏面照射型

電極の反対側から X 線を吸収させるため、電極や絶縁層、中性層を可能な限り薄くなっている。そのため、表面照射型 CCD に比べて低エネルギー X 線の検出効率は優れる。しかし、一般的に吸収点が電極から離れているため、拡散や再結合の影響によりエネルギー分解能が悪くなる。

「すぎく」搭載 XIS のそれぞれの検出効率を図 2.3 に示す。低エネルギーでは BI の方が FI に比べて検出効率が良いことが分かる。

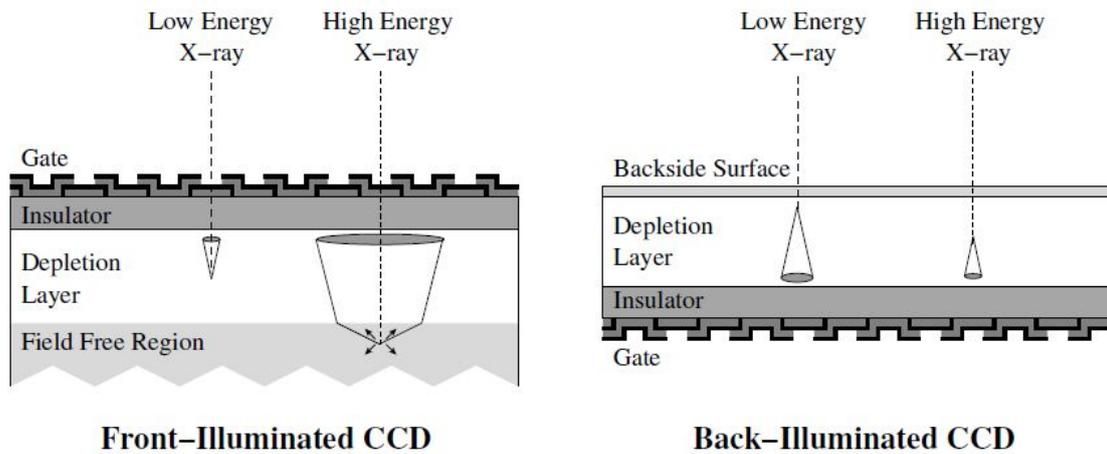


図 2.3: CCD の構造図 [5]。左が表面照射型で右が裏面照射型である。

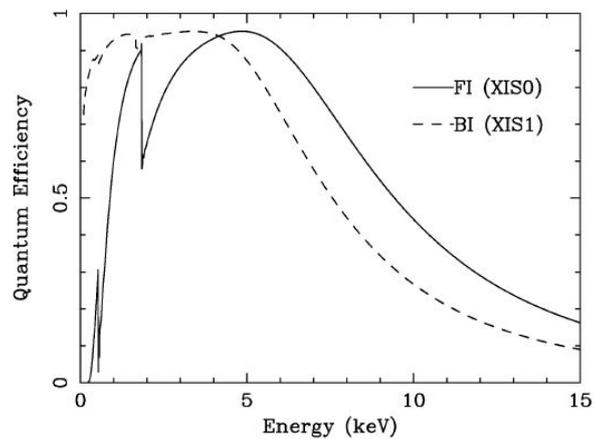


図 2.4: 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD の検出効率。「すざく」の XIS0(表面照射型 : 実線) と XIS1(裏面照射型 : 破線) の検出効率 [13]。BI の方が FI と比べて低エネルギー側の感度が良いことが分かる。

2.1.2 電荷転送の方式と読出し

各画素に蓄えられた電荷は読出し口まで転送されたあと、電圧信号として取り出される。電荷転送方法は利用目的によりいくつか存在するが、XIS では Frame Transfer 方式が用いられている。

Frame Transfer 方式の CCD は、撮像領域と出力のために露光後のデータを一時的に保存する蓄積領域からなる。これは撮像領域で検出した画像を蓄積領域に一度転送し、その後、蓄積領域を順に読み出していくというものである。なお、蓄積領域も撮像領域同様に CCD で構成されているため、X 線や光が入らないようにアルミなどのシールドを設けて高エネルギー X 線に対しても常に遮光された状態を作っている。この遮光は容易にできるため、衛星搭載用 X 線 CCD 検出器ではこの方式が主流である。

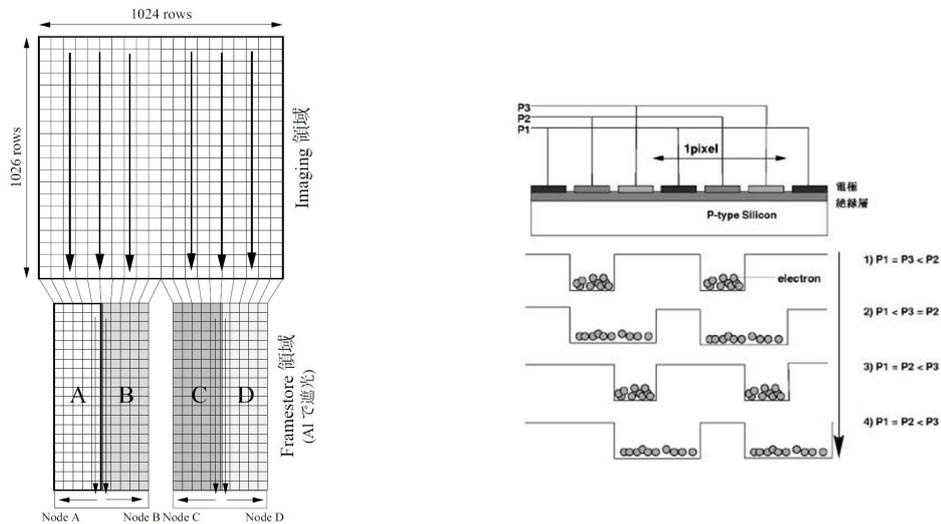


図 2.5: Frame Transfer 方式の模式図 [6] 式図 [5]
 図 2.6: 3相クロックによる電荷転送の模

次に CCD で得た撮像データを 1 個の読出し口から出力するには、各ピクセルに蓄えられた電荷を読出し口まで転送しなければならない。転送のための電圧の制御には電荷転送クロックが用いられる。XIS では 3 相方式が用いられている。3 相方式では 1 ピクセルを 3 つの電極で構成し、順番に電圧をかけることでポテンシャルの井戸を移動させることで電荷を転送する。電圧のかけ方によって逆方向にも転送することができる。

2.1.3 性能劣化の原因

暗電流

暗電流とは CCD に X 線や可視光などが入射していないにも関わらず、電荷が生じることをいう。これは主に Si 結晶中の電子の熱励起が原因である。暗電流が増加すると、その揺らぎによってエネルギー分解能が下がってしまう。ゆえに CCD 素子を冷却することで熱励起の確率を下げるのが重要である。

Hot Pixel・Bad Column

Hot Pixel とは製造過程や製造後の放射線損傷によって、X 線が入射していないにも関わらず常に高い波高値を示すピクセルのことである。このピクセルの後ろ(転送と逆方向)に tail を引くことが多く、解析の際は取り除く必要がある。この tail による読出し方向の画素の列を Bad Column という。

電荷転送効率 (CTE)、電荷転送損失率 (CTI)

CCD の各ピクセルに蓄積された電荷が転送されて読み出される際、電荷の一部が失われて 100 % 転送されないことがある。これは半導体結晶中の格子欠陥が原因である。半導体結晶は製造過程や製造後の放射線損傷で格子欠陥が生じる。これが転送される電荷にとってトラップとなり、転送されずに残ってしまう電荷が生じてしまう。1 回の転送で実際に転送される割合を電荷転送効率 (CTE: Charge Transfer Efficiency) といい、転送されずに残ってしまう割合を電荷転送損失率 (CTI: Charge Transfer Efficiency) という。

CCD はピクセルの位置によって電荷が読出し口に到達するのに要する転送回数が異なるため、CTI の積分値は異なる。CTI が大きくなると本来の X 線エネルギーより低い値を示してしまうので、定期的に正確な CTI の値を知って補正を行う必要がある。

読出しノイズ

電子回路起源のノイズのことをいう。読出しノイズは CCD の実際のピクセル数よりも多く「空読み」することで取得される架空ピクセルのデータを用いて行う。

パイルアップ

1 回の露光時間中、1 ピクセルに複数の X 線が入射すると電荷が足し合わされてしまい、個々の X 線エネルギーを判別出来ずに 1 つの高いエネルギーイベント

とみなされてしまう。これをパイルアップという。パイルアップが起こる確率は X 線の平均検出数に依存し、 512×512 ピクセルの CCD に 100 個の X 線イベントが一様ランダムに検出された場合、パイルアップが起きる確率は 1% 程度である。パイルアップが起こると光子イベントごとの波高を誤って計測することになるので、正しいスペクトルを知ることができなくなってしまう。これを避けるためには、明るい X 線天体を観測する場合は露光時間を短くしたり、フィルターをかけてカウントレートを人為的に落とす必要がある。

光漏れ

X 線 CCD 検出器は可視光にも感度を持つため、遮光が不完全で可視光が入射してしまうと X 線同様にイベントとして検出してしまう。このことを光漏れという。光漏れを防ぐため、撮像領域に可視光遮断フィルタ (2.2.1 章) を設けることで可視光の入射を抑えることができるが、これが不完全で漏れこんでしまう場合がある。光漏れが起きると可視光による電荷がバイアスとなり、補正しきれない場合はエネルギー分解能が劣化する。正しい入射 X 線エネルギーを見積もるためには光漏れの成分を正しく見積もって差し引く必要がある。

2.2 XISの性能

CCDを検出器として使用する場合、性能を詳細に知ることは重要である。「すぎく」は正確で高いエネルギー分解能・検出効率を得るため、様々な機能が備わっている。ここではゲインやエネルギー分解能、検出効率など、XISの性能についてまとめる。

2.2.1 可視光保護フィルター

2.1章で述べたようにCCDは可視光にも感度を持つため、X線を観測する際は可視光を遮断する必要がある。そのため、「すぎく」には可視光保護フィルター(Optical Blocking Filter : OBF)としてPolyimideフィルムの両面にアルミニウムを蒸着したものを使用している。用いられたOBFは0.5 keVで50%、1 keVで90%の透過率を持ち、可視光領域の透過率はおよそ 5×10^{-5} 以下に抑えられている。

宇宙空間では、OBFに汚染物質が付着することが分かっている。この汚染物質は炭素や酸素を含む有機物ということが分かっており、低エネルギー側のX線を吸収して検出効率を低下させてしまう。「すぎく」XISでは超新星残骸E0102-72、中性子星RXJ1856などを繰り返し観測することで、CCDの受光面に対応した場所ごとの付着物質の厚みとその長期変化は求められており、Calibration Databaseに取り入れられている。

2.2.2 電荷注入機能 (Spaced-Row Charge Injection : SCI)

電荷注入機能とは、CCDのピクセルに人為的に電荷を注入して、X線によって生じた電荷と同じように転送して読み出すというものである。これは電荷転送効率(CTE)の正確な測定や回復を目的に付けられた機能である。また、格子欠陥そのものを埋める目的でも用いられる。観測前にあらかじめ十分な量の電荷を流し、前もってトラップを埋めてしまうことで、後から転送されてくる電荷を守るというものである。

図2.7は衛星打ち上げ後の ^{55}Fe ラインのピークと幅の長期変化を表している。打ち上げ後、CTEの劣化によってラインピークの値は下がり、ライン幅は増加していく様子が分かる。500日前後で値が不連続に変わっているのは、SCIを行ったためである。SCIの前後の値を比べると、SCIを行うことで ^{55}Fe ラインのピークと幅の劣化改善されることが分かる。

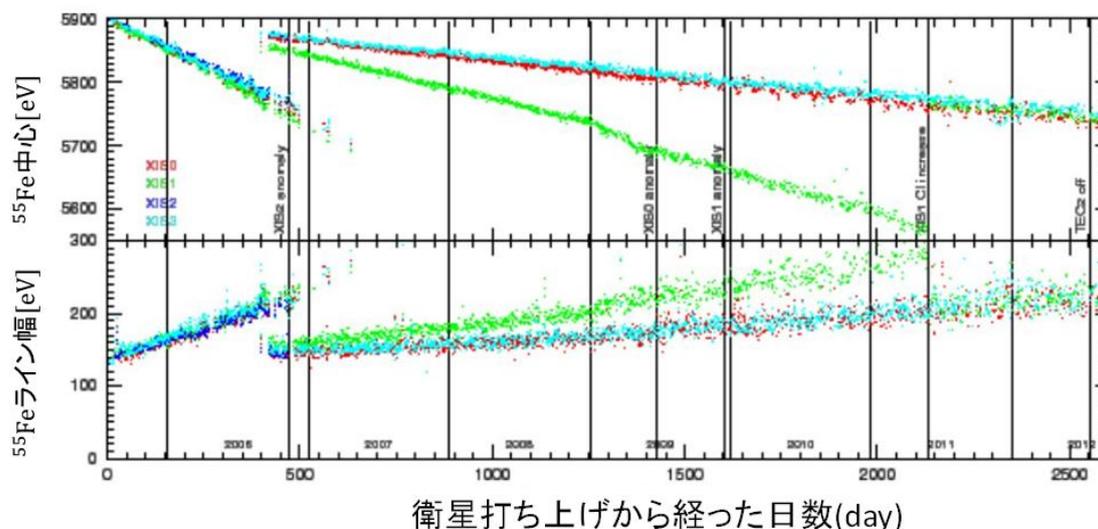


図 2.7: 衛星打ち上げ後の ^{55}Fe ラインのピークと幅の変化。[10] 打ち上げ直後から分解能が下がっている。500 日前後で値が変わっているのは SCI を行ったためである。SCI を行うと分解能が改善されることが分かる。

2.2.3 ゲイン・較正線源

ゲインとは入射 X 線のエネルギーに対して出力される channel 値として測定される。出力 channel は電荷量を電圧情報に変換したものである。線形応答が理想的である。しかし、実際はアナログ・デジタル・コンバータの非線形性の影響などにより、ばらつきが生じてしまう。解析において、このばらつきを含めたゲインを精度良く見積もることが重要である。

「すざく」にはエネルギースケールの絶対値を決めるため、カメラごとに 2 個の較正線源 ^{55}Fe が備わっている。 ^{55}Fe は電子捕獲で ^{55}Mn になる際、 $\text{Mn} - \text{K}_\alpha$ の 5.9 keV と $\text{Mn} - \text{K}_\beta$ の 6.5 keV に強い特性 X 線を放射する。これによりエネルギーの絶対精度が上がる。これは CCD の読出し口から遠い隅に設置され、エネルギースケールの絶対値を較正データとして常時測定している。

2.2.4 エネルギー分解能

CCD で特性 X 線を検出した際に出力される PH(パルスハイト) のヒストグラムは、その検出器のエネルギー分解能に応じた幅をもった Gauss 関数で近似できる。この幅を決めるのは、入射 X 線によって得られる電荷量の統計的な揺らぎである。この電荷量はポアソン統計と完全には一致しない。このずれは Fano 因子 (F) と呼ばれる定数で表される。そこで、統計揺らぎは入射エネルギーを E_0 、Si 半導体中に電子・正孔対を 1 つ作るのに必要なエネルギーを W_{Si} とすると、

$$\sigma_e = \sqrt{F \frac{E_0}{W_{Si}}} \quad (2.1)$$

と表される。なお、Fano 因子は電離・励起過程における衝突が独立で起こるなら 1 であるが、実際は独立でないために揺らぎは小さくなり、Fano 因子は 1 よりも小さくなる。例えば Si の場合は $F = 0.12$ となる。

電荷数に統計的な揺らぎ以外でエネルギー分解能に関係する揺らぎが暗電流の揺らぎと読出しのノイズによる揺らぎである。これらの揺らぎを σ_{read} とすると最終的な電荷量の揺らぎは、

$$\sqrt{\sigma_{read}^2 + F \frac{E_0}{W_{Si}}} \quad (2.2)$$

となる。したがって、エネルギー分解能 δE をガウシアン半値幅 (Full Width at Half Maximum:FWHM) を用いて表すと以下ようになる。

$$\delta E = 2.35 W_{Si} \sqrt{\sigma_{read}^2 + F \frac{E_0}{W_{Si}}} \quad (2.3)$$

例えば外部ノイズの影響が全く無かった時 ($N = 0$)、CCD のエネルギー分解能は 0.4 keV で 40 eV と算出される。

2.3 補正

2.1.3 章で説明したように入射した X 線エネルギーを CCD で読み出す際、暗電流などのオフセットが乗る。正しい入射 X 線の電荷量を知るために、これらを補正する必要がある。

2.3.1 ダークレベル補正

ダークレベルとはピクセルに何も入射していない時のレベル (読み出しノイズと暗電流を足した波高値) のことである。「あすか」の SIS では CCD の放射線損傷でピクセルごとのダークレベルがばらついてしまい、エネルギー分解能が劣化してしまった。XIS ではこのようなことを防ぐため、ピクセル毎のダークレベルを計測して補正を行っている。

ダークレベルは次のように決められている。 n 回目の exposure の、あるピクセルの波高値を $PH(n)$ 、 $n - 1$ 回目の exposure 時でのダークレベルを $D(n - 1)$ とすると $D(n)$ は、

$PH(n) - D(n - 1) >$ ダークレベルの上限値の時、

$$D(n) = D(n - 1) \quad (2.4)$$

$PH(n) - D(n - 1) < \text{ダークレベルの下限值の時}$ 、

$$D(n) = PH(n) \quad (2.5)$$

$\text{ダークレベルの下限值} < PH(n) - D(n - 1) < \text{ダークレベルの上限值の時}$ 、

$$D(n) = D(n - 1) + \frac{PH(n) - D(n - 1)}{h} \quad (2.6)$$

ここでダークレベルの上限・下限値は通常 ± 20 、 h はヒストリーパラメータで通常は 16 と設定されている。

「あすか」などの経験からダークレベルが大きく変化する時 (南大西洋磁気異常帯通過後など) は分かっており、その際は必ずダークレベルを更新する必要がある。また、ダークレベルを更新する際、同時に Hot Pixel も選び出され、その位置情報も更新されるようになっている。

2.3.2 光漏れ量補正

光漏れとは可視光の入射による波高値の変動の値である。この値は衛星が日陰から日照、あるいはその逆に移った時に大きく変化する。

光漏れの値は区分けしたセグメント毎に定義され、通常は 4×16 で区分けされている。あるセグメントについて、 n 回目の撮像時の光漏れ量 $L(n)$ は、まず以下の条件を満たすピクセルの値を取り、その値に $L(n - 1)$ を加えた値である。

$$L(n) = L(n - 1) + PH(n) - D(n) - L(n - 1) \quad (2.7)$$

$$LightLow < PH(n) - D(n)/8 - L(n - 1)/8 < LightUpper \quad (2.8)$$

ここで、 $LightLow/Upper$ は光漏れ閾値の上下限值である。また、 $L(n)$ が max-Light と呼ばれる値を超えた場合は $L(n) = \text{maxLight}$ として次の撮像時にこの $L(n)$ を光漏れ量として与えられるようになっている。

第3章 超高層大気の観測および解析

前章では XIS の性能について述べた。本章では XIS を用いて試験的におこなった地球超高層大気の観測データ取得から解析方法までを述べる。データリダクションおよび解析には「すざく」のデータ解析用ソフトウェアパッケージである HEAsoft version6.20¹ 内の FTOOLS² および XSELECT2.4³、XSPEC12.9.1⁴ を用いた。

3.1 用いたデータ

「すざく」の観測データはすべて FITS(Flexible Image Transport System : [8])形式に変換され、DARTs⁵ より配布されている。配布データには X 線の到来時刻やイベント種別、天空上での座標などの校正情報付加した unfiltered event file と、さらに地没などの非天体観測時のデータを除去した cleaned event file がある。今回は日照地球の大気を観測しているデータを得たいので、unfiltered event file を用いる。

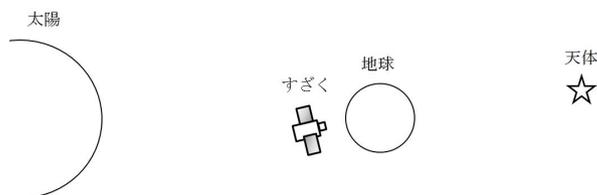


図 3.1: 「すざく」が地球大気を観測するイメージ。「すざく」は地球を周回しているため、天体観測中に衛星・地球・天体が図のような位置関係になることがある。この時、「すざく」は太陽 X 線に照射された地球大気を観測していることとなる。

¹<https://heasarc.nasa.gov/lheasoft/>

²https://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/ftools_menu.html

³<https://heasarc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/ftools/xselect/xselect.html>

⁴<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

⁵https://www.darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku//public_list/public_seq.html

「すざく」は低地球軌道を三次元空間固定姿勢で周回しているため、観測データに地球方向を観測している時間が含まれる。よって、どの天体観測データにも地球大気の観測データは含まれる。今回は2005年9月9日にSN1006 NE-Rimを観測していたデータを用いることとする。なお、期待される窒素原子と酸素原子の特性X線のエネルギーは392.4 eVと524.9 eVであるので、低エネルギー帯域の観測に優れたXIS1の観測データを用いる(図2.3)。

表 3.1: 解析に用いたデータ

Name	Obs.ID	Detector	Obs.Date(UT)	Effective Exposure
SN1006 NE-Rim	100019020	XIS1	2005.9.9.04:02:23	2364 sec

3.2 データリダクション

今回、我々はunfiltered event fileを用いるため、地球大気の観測データを抽出するデータリダクションを行う必要がある。まず、FTOOLに含まれるxispiでCalibration Data base[11]を用いた較正を行う。xispiではCTI補正やX線イベントの識別、信号電荷が複数の画素にスプリットする場合に補正するパルスハイト合成、ゲイン補正が行われる。その後、CLEANSIS2.8を用いてhot pixelやflickering pixelを取り除いた。以上のデータ処理後、XSELECTを用いて衛星の軌道位相やテレメトリーの状態を表す時系列情報(HKデータ)にもとづいてイベントデータ選択を行う。本研究では以下で詳述するデータリダクションを行い、昼地球を観測しているスペクトルファイルを作成した。

Sourh Atlantic Anomaly(SAA)

SAA(南大西洋磁気異常帯)とは南緯31度付近の南大西洋上空500 kmに分布する荷電粒子(主に陽子と電子)が多量に存在する領域のことである。地磁気の中心が地球の幾何学的中心からずれており、地磁気にはトラップされた荷電粒子が大量に存在する。衛星がSAAを通過すると荷電粒子と検出器が反応し、放射線同位体を形成することによって、検出器自体が放射性バックグラウンド源となる。したがって、解析の際はSAA通過中と通過後一定時間のデータは取り除く必要がある。本研究では、「すざく」XISで標準的に用いられている基準にしたがって、SAAを通過中の時間、およびSAAを通過後436秒までのデータは除いた。

Earth Elevation Angle(ELV)

ELVは衛星の向いている方向と地球接線とのなす角のことである。ELV < 0の時、衛星の観測軸は地球方向を向いていることとなる。ELVにはDYE __ ELVとNTE __ ELVというのもあり、それぞれ昼地球及び夜地球からの仰角を示している。本研究では太陽放射の影響を観測するため、ELV < 0とNTE __ ELV > 0とすることで、太陽に照射された地球(昼地球)を観測している観測データを選択している。

Telemetry saturation

Telemetry saturationとは観測している天体が明るすぎる時や週末運用でdata rateを落としている時に起こる現象である。XISでは観測されたデータ量がTelemetry limitを超えるとデータ転送が中断され、saturationの起こったフレームのデータが欠け、不完全なデータになってしまう。Telemetry saturationの起こった時間帯はDARTsから得られるHouse Keeping Dataにまとめられ、配布されている。本研究ではHouse Keeping Dataを用いてTelemetry saturationの起こった時間帯は取り除いた。

3.2.1 バックグラウンド

XISのバックグラウンドは非X線バックグラウンド(Non X-ray Background : NXB)とX線バックグラウンドの2種類がある。NXBは荷電粒子や γ 線などが検出器を構成する物質に入射した際に、発生する制動放射や特性X線である。一方、本研究では太陽X線が地球大気によって散乱、再放出される大気X線を観測対象とするので、X線バックグラウンドとしては荷電粒子や中性子に起因する大気X線放射が考えられる。本研究ではこれらを除くため、同じ観測データの中から夜地球を観測しているデータをバックグラウンドとして採用した。

3.2.2 レスポンスの作成

作成したスペクトルファイルをXSPECでスペクトルフィットを行うにはrmf (Restribution Matrix File)とarf (Ancillary Response File)の2つの応答関数ファイルが必要である。rmfは入射光子のエネルギーとそのエネルギー応答である波高値(channel値)の確率分布を行列として保存したファイルであり、arfは望遠鏡を含む検出器の入射角度と入射エネルギーごとの有効面積をモンテカルロシミュレーションを用いて求めたものである。arfはXISのOBFに附着しているコンタミネーションの影響を考慮した計算がなされている。

この応答関数は XIS チームによって地上試験および軌道上較正試験をもとに作成され、Calibration Data base として公開されている。

3.3 スペクトル解析

3.2 章までで述べたデータ処理によって得られたエネルギースペクトルを図 3.2 に示す。窒素原子、酸素原子の特性 X 線の値はそれぞれ 392.4 eV、524.9 eV[12] であり、観測された輝線は地球大気からの特性 X 線は窒素と酸素由来であることが分かる。

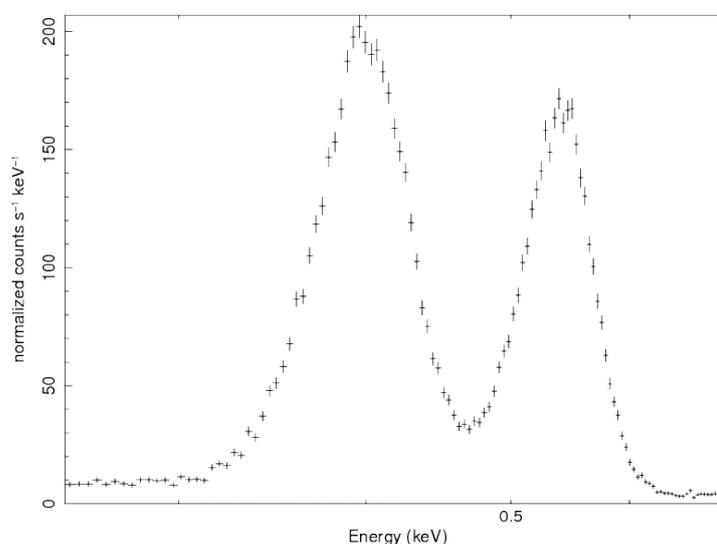


図 3.2: 昼地球大気から得られたスペクトル

特性 X 線はガウシアン関数でよく再現できることが知られている。

$$A(E) = K \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E - E_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

E_i … Line energy[keV]

σ … line width[keV]

K … total photons/cm⁻²/s in the line

以下、2つのガウシアン関数と連続成分として1つのべき関数でフィッティングを行った結果 (a) を図 3.3 と表 3.2 に示す。

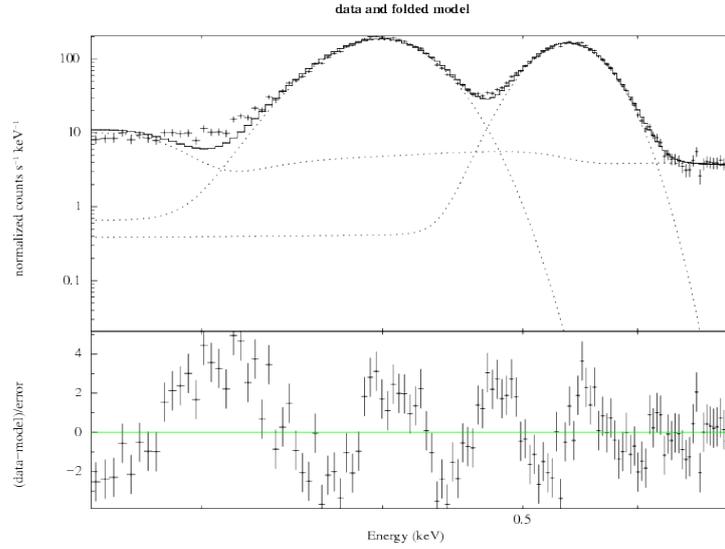


図 3.3: ベストフィットの昼地球大気のスเปクトル (a)

表 3.2: 地球大気 of ベストフィットパラメータ (a)

parameter	N	O
E_l [keV]	0.3933 ± 0.0003	0.5388 ± 0.0002
σ [keV]	0.0235 ± 0.0003	0.0174 ± 0.0003
K	1.3218 ± 0.0082	0.5693 ± 0.0038

この時、 $reduced - \chi^2 / d.o.f.$ の値は $4.05(461.4/114)$ となった。ここでガウシアン関数の σ の値について考える。検出器の応答による広がり、応答関数に含まれているので、ここで得られたフィッティングパラメータとしての σ の解釈として大気粒子の速度分散をまず検討する。超高層大気 of 気温を 1000 K とし、大気全てが窒素を主成分とした理想大気と仮定すると、その速度は以下のように計算される。

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 943\text{ km/s} \quad (3.2)$$

速度分散は光速との比で求められるので、超高層大気 with 期待される σ は 3.15×10^{-3} となり、フィッティングの結果はこの予想より 7.4 倍大きい値となっており、期待される輝線幅よりも明らかに広いと結論できる。仮に σ を 0 となるように固定して再度フィッティングを行った結果 (b) を図 3.4 と表 3.3 表す。

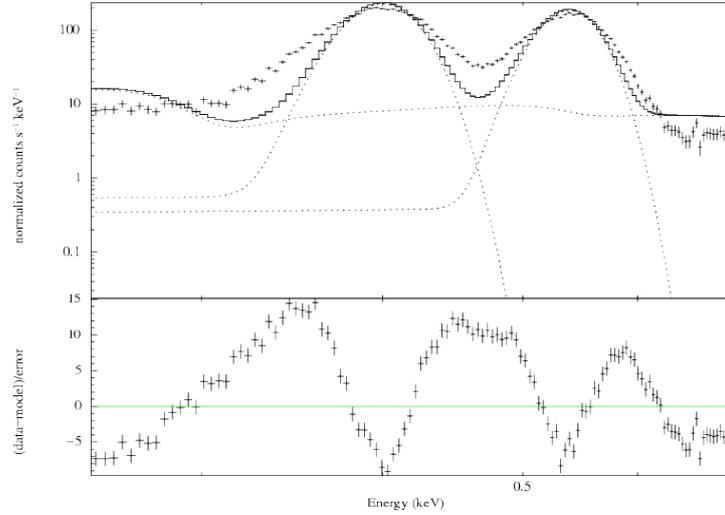


図 3.4: 昼地球大気のスเปクトル (b)

表 3.3: 地球大気のパラメータ (b)

parameter	N	O
E_{Line} [keV]	0.3980 ± 0.0003	0.5361 ± 0.0002
σ [keV]	0(固定)	0(固定)
K	1.0273 ± 0.0066	0.5461 ± 0.0063

この時、 $reduced - \chi^2/d.o.f.$ の値は $50.76(5888.89/122)$ となり、フィッティングは合っていないが、残差に特徴的な構造が見て取れる。すなわち、図 3.4 よりスペクトルをみると輝線の幅は左右対称ではなく、低エネルギー側の方が大きく広がって (大きな残差を示して) いる。電荷収集非効率などによる低エネルギー tail によく似た構造である。通常、天体観測に使用される帯域、X 線強度であれば、XIS の tail 構造はよく調べられており、応答関数に含まれているはずである。しかし、今回の観測帯域は低エネルギーかつ非常に明るい領域であるため、通常の日観測とは条件が異なり、その影響は慎重に検討する必要がある。次章では特にこの点に注目して、XIS 較正について詳細に検討する。

第4章 較正の評価

地球大気からのスペクトルを見たところ、窒素と酸素の輝線幅に有意な広がりが見られた。今回の観測領域は低エネルギーかつ非常に明るい領域であるため、可視光の流入など天体観測とは異なった較正の不定性の影響を考える必要がある。この章では、特に輝線幅の広がりの原因になりうる電荷転送効率の劣化と光漏れ量補正について、評価を行う。

4.1 電荷転送効率の評価

2.1.3章で述べたように CCD は打ち上げ後、放射線損傷によってその性能は劣化する。「すぎく」にはこれを補うために電荷注入機能 (SCI, 2.2.2章) が備わっており、最初に SCI が行われたのは 2006 年 8 月である。今回用いたデータは SCI 以前 (2005 年 9 月 9 日) の観測データであり、観測帯域も低いことから、CTE の劣化によって輝線幅が広がっている可能性がある。そこで CTE の劣化の影響について検討した。

4.1.1 電荷転送効率の評価方法

今回の観測では全領域からのスペクトルをみていた。CTE の劣化は電荷の読出しの際に効くため、X 線の入射場所が読出し口から遠くなればなるほど、その劣化は顕著になるはずである。そこで CTE を調べるため、図 4.1 のように CCD の電荷読出し口から近い領域を A、中央の領域を B、遠い領域を C として 3 つ領域に分割し、それぞれのスペクトルを作成した。そして一つのスペクトルに 2 個のガウシアン関数を用いることで、tail 成分と輝線を評価した。なお、 σ はすべて 0 に固定した。2 つのガウシアン関数のうち、高エネルギー側は輝線そのものを表し、低エネルギー側は CTE の劣化による (応答関数が再現できない) 低エネルギー tail を便宜的に表している。このとき、CTE の劣化が大きくなると tail が低エネルギーに大きく延び、結果として低エネルギー側のガウシアン関数の中央エネルギー値は低く評価されるはずである。よって、CTE の劣化が起きている場合、 $E_{Line_{NorO}}/E_{tail_{NorO}}$ 比は大きい値となるはずである。

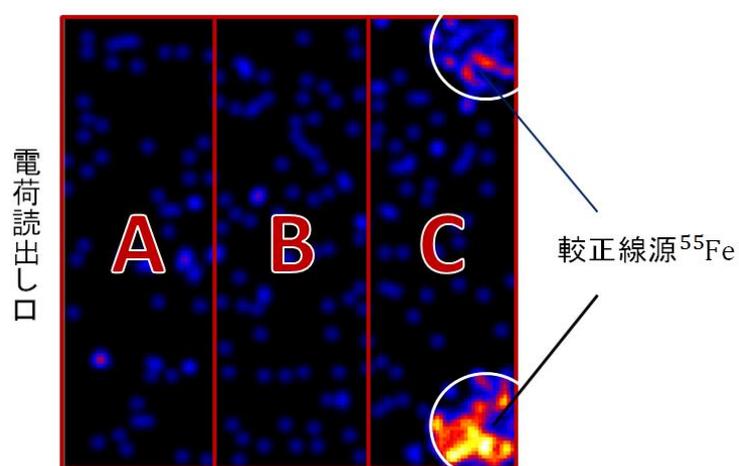


図 4.1: XIS を用いた地球大気の観測時の画像の例。図のように3つの領域に分けた。校正線源とその反対にある読出し口の位置を分かりやすくするため、エネルギー範囲を校正線源が強くみられる 5.5- 6.5 keV に設定している。

4.1.2 電荷転送効率の評価結果

各領域のスペクトルとベストフィットのパラメータの値を図4.2と表4.1に示す。図4.2を見ると、どの領域のスペクトルも形は同じである。図4.2の全領域を同時に描いた図(左上)をみると領域B(赤線)が少し高く出ているように見えるが、これはXISの視野中心の有効面積がXISの視野周辺に比べて広いためであると考えられる。また、表4.1をみると $E_{Line_{NorO}}$ と $E_{tail_{NorO}}$ の値はおおよそ一致している。

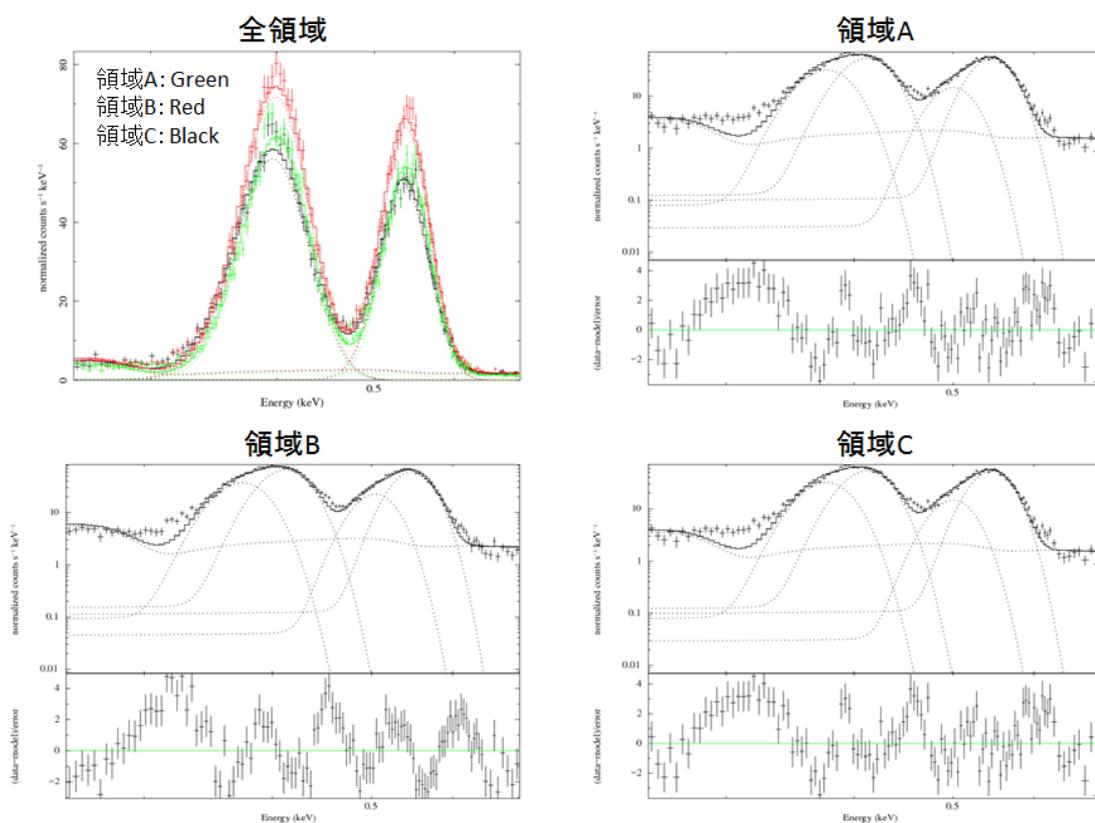


図 4.2: 観測領域を分割した際のベストフィットのスペクトル。左上: 3領域のスペクトルを1つの図にまとめたもの。緑線が領域A、赤線が領域B、黒線が領域Cを表している。他: 観測領域を分割した際のベストフィットのスペクトル。

表 4.1: 観測領域を分割した際のベストフィットパラメータ

parameter	領域 A	領域 B	領域 C	
N	E_{Line_N} [keV]	0.4120 ± 0.0005	0.4120 ± 0.0005	0.4080 ± 0.0005
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K_{Line_N}	0.7370 ± 0.0241	0.7302 ± 0.0194	0.9002 ± 0.0237
N tail	E_{tail_N} [keV]	0.3746 ± 0.0009	0.3727 ± 0.0008	0.3685 ± 0.0009
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K_{tail_N}	0.5504 ± 0.0208	0.5324 ± 0.0181	0.6661 ± 0.0236
O	E_{Line_O} [keV]	0.5460 ± 0.0005	0.5465 ± 0.0007	0.5444 ± 0.0006
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K_{Line_O}	0.6765 ± 0.0176	0.5324 ± 0.0181	0.7054 ± 0.0137
O tail	E_{tail_O} [keV]	0.4980 ± 0.0016	0.5036 ± 0.0015	0.4963 ± 0.0014
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K_{tail_O}	0.1171 ± 0.0057	0.1346 ± 0.0065	0.1662 ± 0.0069
<i>reduced</i> – $\chi^2/\mathbf{d.o.f.}$	3.9995(403.95/101)	3.9590(415.69/105)	4.0195(414.01/103)	

表 4.2 は各領域の $E_{Line_{NorO}}/E_{tail_{NorO}}$ と $K_{Line_{NorO}}/K_{tail_{NorO}}$ を表している。CTE が劣化している場合、 $E_{Line_{NorO}}/E_{tail_{NorO}}$ は A → B → C の順に大きく、 $K_{Line_{NorO}}/K_{tail_{NorO}}$ は A → B → C の順に小さくなることが予想される。しかし、どちらもそのような傾向はみられない。ゆえに CTE の劣化は輝線幅の広がりに影響していないことが確認された。

表 4.2: 各領域の $E_{Line_{NorO}}/E_{tail_{NorO}}$

	領域 A	領域 B	領域 C
E_{Line_N}/E_{tail_N}	1.099 ± 0.003	1.105 ± 0.003	1.107 ± 0.004
K_{Line_N}/K_{tail_N}	1.339 ± 0.067	1.372 ± 0.060	1.352 ± 0.060
E_{Line_O}/E_{tail_O}	1.096 ± 0.004	1.085 ± 0.004	1.097 ± 0.004
K_{Line_O}/K_{tail_O}	5.778 ± 0.319	3.955 ± 0.234	4.244 ± 0.195

4.2 光漏れ量補正による評価

次に光漏れ量補正が正しく行われているかについて、評価をおこなう。2.3.2章で述べたように、光漏れ量補正とは可視光の入射による波高値の変動を補正することである。この補正が適正に行われないと、可視光のイベントがスペクトルに加わってしまい、特性 X 線を見る際のノイズとなってしまう。図 4.3 は XIS1 の各セグメントの平均光漏れ量の変動を示したグラフである。オレンジ色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球の観測開始および終了時刻を表している。図 4.3 より、昼地球の観測が近づくにつれて、光漏れ量の値は高くなっていくことが読み取れる。

今回の観測領域は明るい昼地球であり、天体観測時に比べて多くの可視光が入射し、しかも時間的に大きく変動しているため、補正が適正しきれていない可能性がある。そこで光漏れについて、以下のような確認を行った。

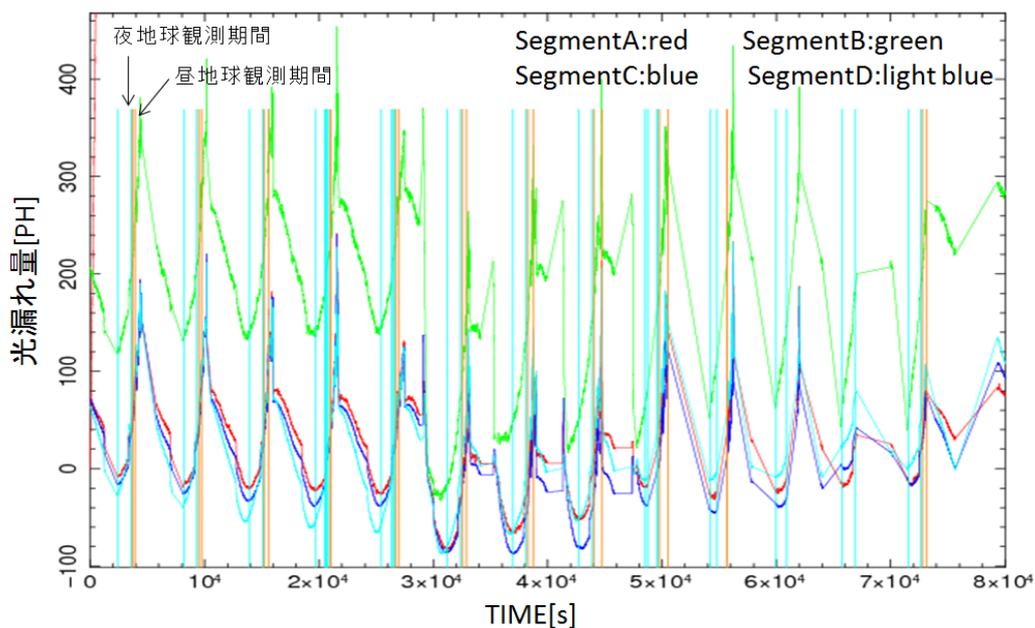


図 4.3: 2005 年 9 月 9 日の光漏れ量の変動。縦軸は光漏れ量の値、横軸は観測開始時刻からの経過時刻を表している。オレンジ色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球の観測開始および終了時刻を表している。

4.2.1 光漏れ量補正の方法

2.3.2章で述べたように、 n 回目の撮像時の光漏れ量 $L(n)$ とすると、光漏れ量補正が適正に行われない場合は $-20 < L(n)/8 - L(n-1)/8 < 20$ であった時である。そこで、観測データの光漏れ量の変動を確認することで、 $-20 < L(n)/8 - L(n-1)/8 < 20$ となった時がないかを確認する。

光漏れ量は unfiltered event file 内にすべて記録されており、fv などで見ることができる。まず、較正を行ったあとの unfiltered event file から光漏れ量 $L(n)$ を得る。そして全パーテーション(各セグメントは64個のパーテーションに区切られている)の $L(n) - L(n-1)$ を求め、昼地球を観測している期間に $-20 < L(n)/8 - L(n-1)/8 < 20$ すなわち $-160 < L(n) - L(n-1) < 160$ となった時がないかを確認した。

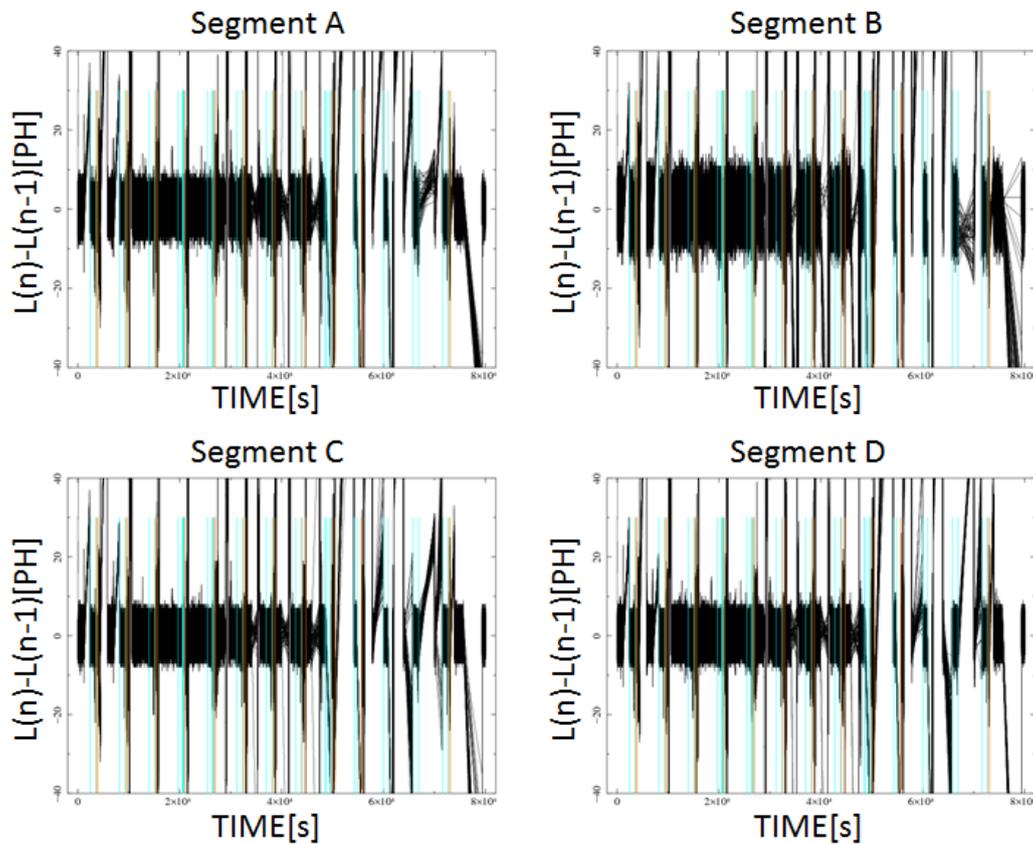


図 4.4: $L(n) - L(n-1)$ の時間変動。縦軸は $L(n) - L(n-1)$ の値、横軸は観測開始時刻からの経過時刻を表している。橙色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球の観測開始および終了時刻を表している。

4.2.2 光漏れ量補正の結果

$L(n) - L(n - 1)$ の変動のグラフを図 4.4 と図 4.5 に示す。図 4.4 は観測開始時刻から 80000 sec までの変動、図 4.5 は昼地球と夜地球を観測している時間を含む 2000- 4000 sec で区切ったものである。なお、橙色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球の観測開始および終了時刻を表している。図 4.4 を見ると、 $L(n) - L(n - 1)$ の変動は ± 40 以上変動している時もあるが、およそ ± 10 で変動している。図 4.5 のように昼地球の観測期間に着目しても、およそ ± 10 で変動しており、全ての昼地球観測期間も確認したが、 $-160 < L(n) - L(n - 1) < 160$ を満たす期間はなかった。したがって、光漏れ量の補正は行われている。

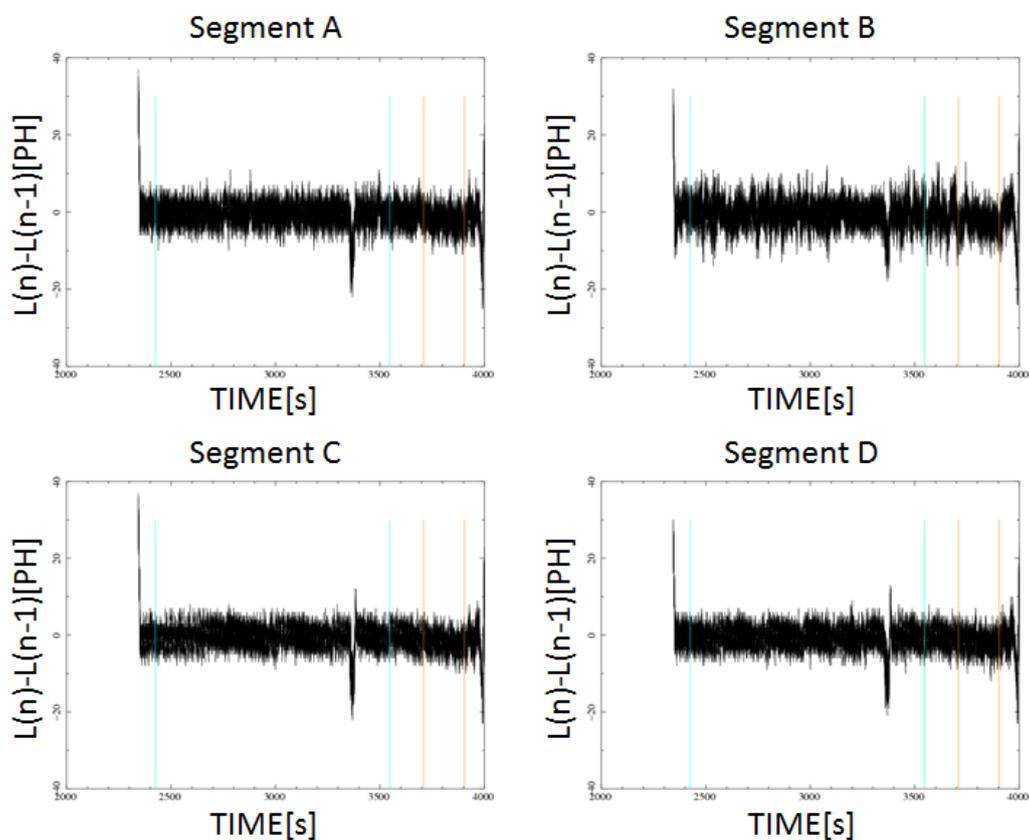


図 4.5: $L(n) - L(n - 1)$ の時間変動の拡大図。夜地球および昼地球を観測している時刻を切り出した。橙色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球の観測開始および終了時刻を表しており、その期間は ± 20 を超える時はないことが分かる。

4.2.3 光漏れ量揺らぎによるスペクトルの評価

4.2.2 節で光漏れ量の補正が適正に行われていることが分かった。ここでは、光漏れ量の揺らぎによってスペクトルに変化が生じるかを確認する。なお、この確認には2005年11月2日にBD +30 3639を観測していたデータを用いた。この日の観測データは2005年9月9日の観測データに比べて昼地球観測時の光漏れ量の揺らぎの値が大きい。ゆえに、もし光漏れ量の変動によってスペクトルに変化があるとすれば、顕著に表れるはずである。

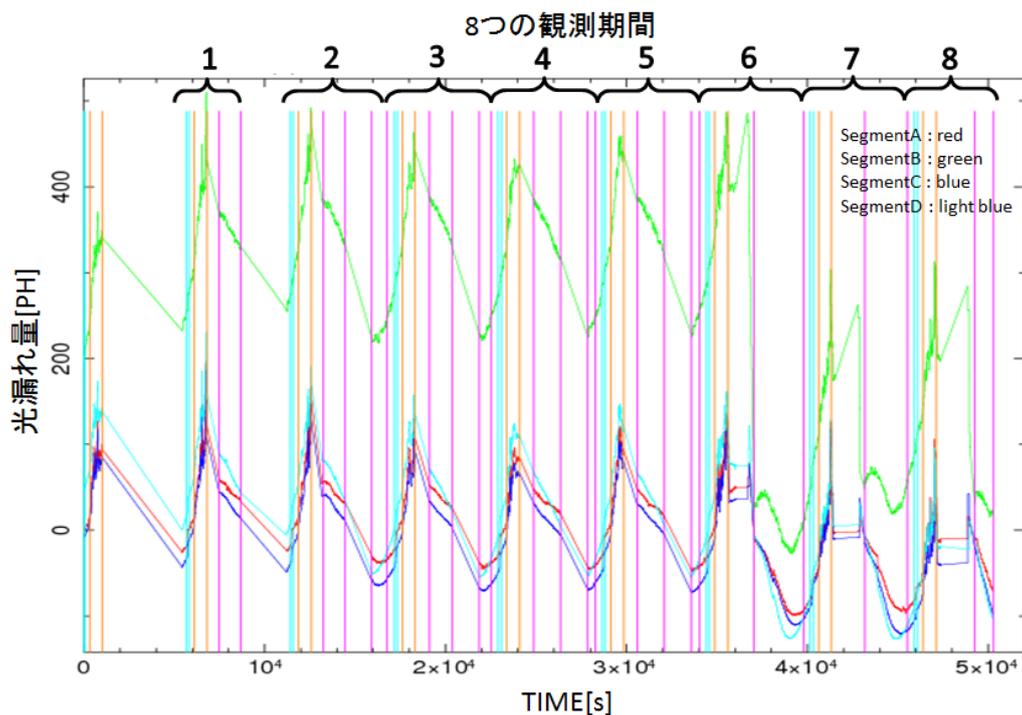


図 4.6: 2005 年 11 月 2 日の光漏れ量の変動。縦軸は光漏れ量の値、横軸は観測開始時刻からの経過時刻を表している。橙色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球、桃色は天体の観測開始および終了時刻を表している。

図 4.6 は光漏れ量の変動を表しており、橙色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球、桃色は天体の観測開始および終了時刻を表している。図 4.7 は 11000- 17000 sec に区切ったものである。図 4.7 の昼地球観測期間をみると夜地球や天体観測期間に比べて光漏れ量が揺らいでいる期間がある。この揺らぎが観測時間によって、どの程度変化があるかを調べるため、図 4.6 のように 8 つの観測期間に分け、それぞれの観測期間の光漏れ量の揺らぎの平均値を求めた。

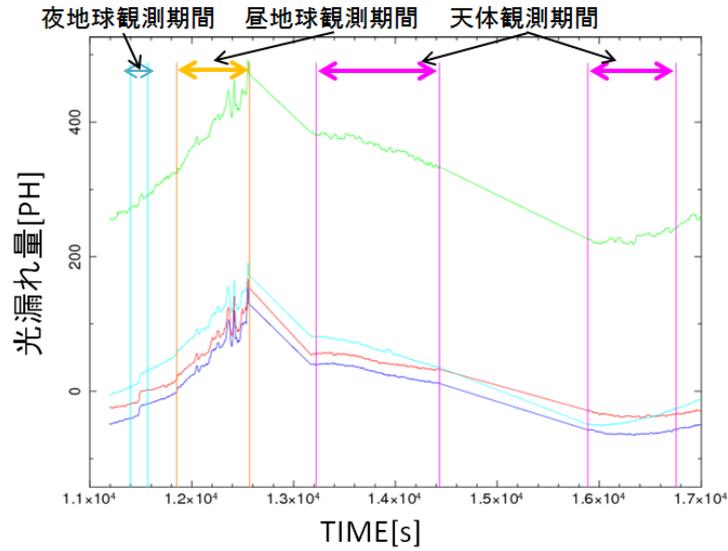


図 4.7: 2005 年 11 月 2 日の光漏れ量の変動 (11000- 17000 sec)。縦軸は光漏れ量の値、横軸は観測開始時刻からの経過時刻を表している。橙色の縦線は昼地球、水色の縦線は夜地球、桃色は天体の観測開始および終了時刻を表している。

光漏れ量は各セグメントの各パーテーションごとに記録されている。まず、全パーテーションの $L(n) - L(n - 1)$ を求め、各セグメントの $L(n) - L(n - 1)$ の平均値 F_n を求める。

$$F_n = \frac{\sqrt{(L_1(n) - L_1(n - 1))^2 + \dots + \sqrt{(L_{64}(n) - L_{64}(n - 1))^2}}{64} \quad (4.1)$$

得られた F_n を元に各観測期間の揺らぎの平均値を求めた。図 4.8 は各観測期間、各観測領域の光漏れ量の揺らぎの値を示しており、赤線は昼地球観測時、青線は夜地球観測時、緑色は天体観測時の値である。なお、XIS は 4 つのセグメントに分れているため、それぞれ 4 本のデータ線がある。図 4.8 より、夜地球観測時と天体観測時は光漏れ量の揺らぎは観測期間に関わらず、おおよそ一定である。一方、昼地球観測時は観測期間によって変動しており、観測期間 1 と観測期間 5 の光漏れ量の揺らぎの平均値を比較すると、観測期間 5 は観測期間 1 より 2 倍ほど大きいことが分かった。

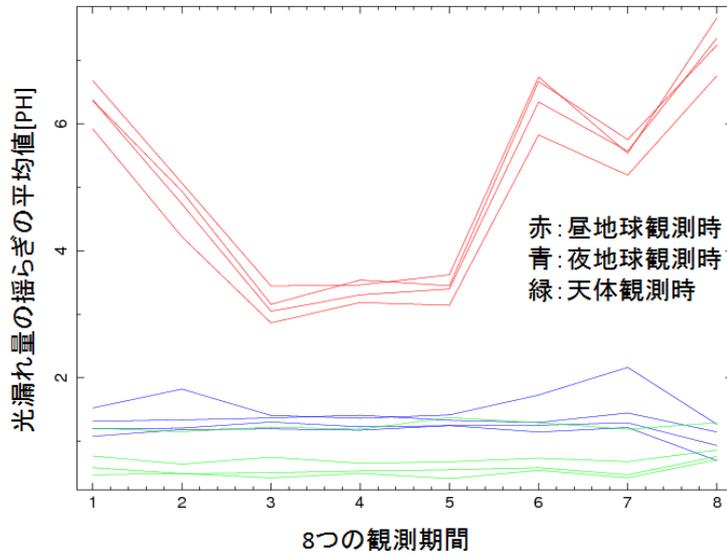


図 4.8: 各観測期間、各観測領域の光漏れ量の揺らぎ

観測期間1と観測期間5の昼地球観測時のスペクトルを評価する。なお、どちらの観測時間は約590 secであり、昼地球観測時のスペクトルを評価するためにバックグラウンドはひかずにフィッティングをおこなった。その結果を図4.9と表4.3に示す。

表 4.3: 観測期間1と観測期間5の昼地球のベストフィットのパラメータ

parameter	観測領域1	観測領域5
E_{Line} [keV]	0.389 ± 0.002	0.390 ± 0.002
N σ [keV]	0.030 ± 0.002	0.027 ± 0.002
K	0.891 ± 0.031	0.975 ± 0.031
E_{Line} [keV]	0.542 ± 0.001	0.540 ± 0.001
O σ [keV]	0.018 ± 0.002	0.017 ± 0.002
K	0.329 ± 0.010	0.354 ± 0.010
<i>reduced</i> - χ^2 / d.o.f.	1.306(103.174/79)	1.459(124.015/85)

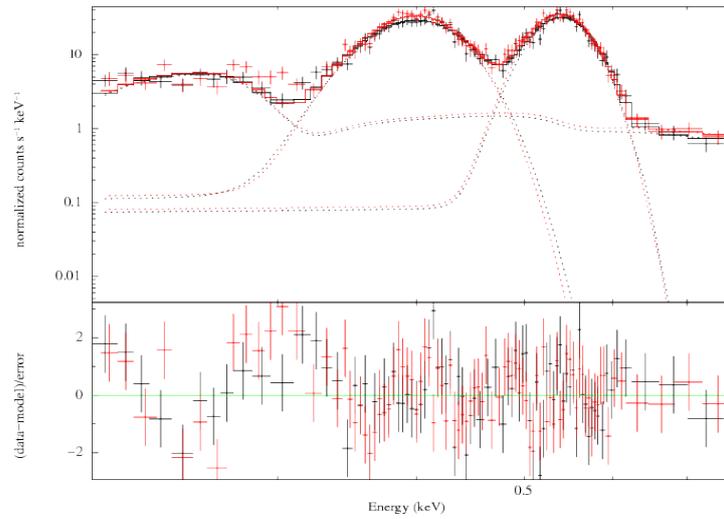


図 4.9: 観測期間 1 と観測期間 5 の昼地球のベストフィットのスペクトル。黒線が観測期間 1、赤線が観測期間 5 を表している。

図 4.9 より、スペクトルの形に明らかな差はみられない。表 4.3 の各パラメータの値を比較すると E_{Line} と σ に関しては誤差の範囲内で一致している。窒素の K をみると観測領域 5 の方が観測領域 1 と比較して 10 % ほど大きい値がでているが、観測領域 5 は光漏れ量の変動が小さい期間であるので、この増加が光漏れ量の変動に影響しているとは考えられない。これは観測時間が異なるためにイベント数が異なっているためと考えられる。

第5章 議論

4章では電荷転送効率と光漏れ量に着目することで、地球大気からの輝線にみられる幅の広がりについて確認をおこなった。その結果、低エネルギー帯域かつ非常に明るい地球を観測している時間でも、較正は適正に行われていると考えて良いことが分かった。よって、観測でみられた低エネルギー側の tail 成分は、地球大気起源のものである可能性が示唆される。しかしながら、較正の確認から推測しきれていない検出器応答が含まれている可能性が排除しきれない。そこで本章では、低エネルギー側の tail 成分を応答関数に表し切れていないエネルギー応答と、地球大気起源の輝線成分をあわせて現象論的にガウシアン関数でモデル化した上で、残る高エネルギー輝線成分について地球大気起源の成分として評価をおこなう。

5.1 酸素・窒素比の検討

3.3章では単一の原子状態輝線として、連続成分と窒素・酸素輝線のそれぞれに1個のガウシアンモデルを用いてフィッティングをおこなっていた。しかし、実際の地球大気は原子と分子が複雑に混じりあった状態と考えられている。ここでは、より正確に地球大気の組成を再現するため、現象論的なモデルとしての tail 成分と連続成分、原子輝線と分子輝線が重なり合っているために幅を持つ1つのガウシアンモデルでフィッティングを行った(c)。

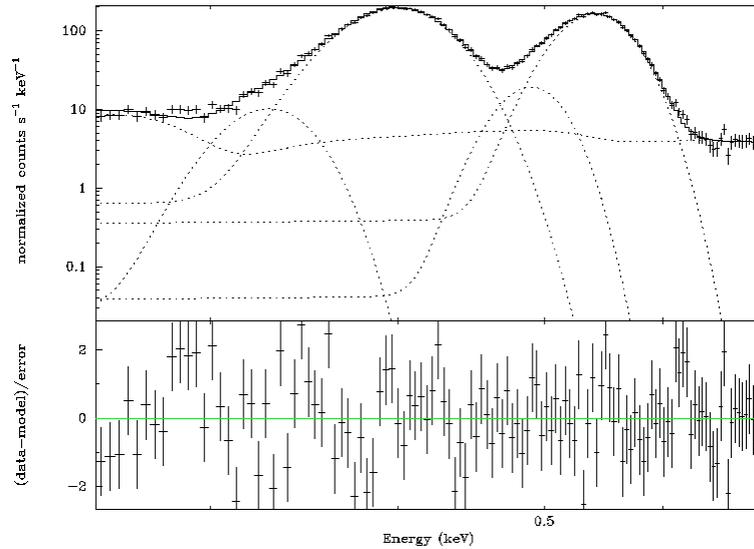


図 5.1: 1つのスペクトルに2つのガウシアンを用いた場合のベストフィットのスペクトル (c)

この時、 $reduced - \chi^2/d.o.f.$ は $1.4232(156.55/110)$ となり、 $\sigma = 0$ に固定して1つのガウシアンでフィッティングを行った時 (b) と比較すると、改善している。得られた値を用いて窒素と酸素の比を求める。

$$(N + N_2)/(O + O_2) = \frac{1.2560 \pm 0.0107}{0.5504 \pm 0.0063} = 2.282 \pm 0.0326 \quad (5.1)$$

得られた原子・分子比を NASA が提供している NRLMSISE-00 Atmosphere Model¹ と比較する。なお、NRLMSISE-00 Atmosphere Model は過去の実測を元に作成されたシミュレーションであり、日付・時刻・緯度・経度などの条件を設定すると、高度ごとの物質の体積密度を算出してくれる。今回は 2005 年 9 月 9 日 5 時の北緯 10- 30 度、東経 110 度 (本研究で用いた観測データの観測場所と見積もられる領域) の X 線放射高度と見積もられる高度 100- 300 km [3] の窒素と酸素それぞれの原子・分子の密度を算出し、それぞれの原子・分子比と原子と分子が混合状態である場合の窒素・酸素比を求めた。

¹<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>

表 5.1: 1つのスペクトルに2つのガウシアンを用いた場合のベストフィットのパラメータ (c)

	Parameter	N	O
原子+分子	E_{Line_N} [keV]	0.3953 ± 0.0003	0.5414 ± 0.0006
	σ [keV]	0.0199 ± 0.0004	0.0139 ± 0.0007
	K	1.2560 ± 0.0107	0.5504 ± 0.0063
tail	E_{Line_N} [keV]	0.3260 ± 0.0022	0.4898 ± 0.0037
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)
	K	0.1112 ± 0.0079	0.0499 ± 0.0071
$reduced - \chi^2/\mathbf{d.o.f.}$		1.4232(156.55/110)	

表 5.2 の値と本研究で得られた窒素・酸素比を比較すると、得られた値はおよそ高度 120- 130 km 付近の値と一致している。以上より、XIS から得られた地球大気のスเปクトルは tail 成分である幅の持たないガウシアンモデル1つと、原子輝線と分子輝線が混ざり合っているために幅を持つガウシアンモデル1つで非常によく再現することができ、原子と分子が混同している状態の窒素/酸素比を求めることができた。

表 5.2: NRLMSISE-00 Atmosphere Model より求めた窒素・酸素比とそれぞれの原子・分子比。2005 年 9 月 9 日 5 時の北緯 10- 30 度、東経 110 度と設定して求めた。

高度 [km]	N/N_2	O/O_2	$(\text{N} + \text{N}_2)/(\text{O} + \text{O}_2)$
100	4.450×10^{-8} - 4.575×10^{-8}	0.184 - 0.188	3.632 - 3.658
110	5.260×10^{-7} - 5.345×10^{-7}	0.740 - 0.748	3.222 - 3.261
120	5.162×10^{-6} - 5.256×10^{-6}	1.967 - 1.979	2.627 - 2.694
130	3.349×10^{-5} - 3.409×10^{-5}	3.543 - 3.585	2.155 - 2.213
140	1.535×10^{-4} - 1.561×10^{-4}	5.211 - 5.294	1.798 - 1.842
150	5.206×10^{-4} - 5.295×10^{-4}	6.993 - 7.128	1.522 - 1.557
160	1.372×10^{-3} - 1.394×10^{-3}	9.027 - 9.214	1.300 - 1.328
170	2.944×10^{-3} - 2.995×10^{-3}	11.432 - 11.679	1.117 - 1.139
180	5.379×10^{-3} - 5.472×10^{-3}	14.312 - 14.624	0.963 - 0.982
190	8.677×10^{-3} - 8.831×10^{-3}	17.786 - 18.171	0.833 - 0.849
200	0.013 - 0.013	22.004 - 22.460	0.722 - 0.736
210	0.018 - 0.018	27.101 - 27.639	0.626 - 0.638
220	0.023 - 0.023	33.319 - 33.923	0.543 - 0.554
230	0.029 - 0.029	40.870 - 41.549	0.472 - 0.482
240	0.035 - 0.036	50.000 - 50.790	0.410 - 0.419
250	0.043 - 0.044	61.138 - 62.042	0.357 - 0.365
260	0.051 - 0.052	74.631 - 75.632	0.310 - 0.318
270	0.061 - 0.062	91.105 - 92.186	0.271 - 0.278
280	0.072 - 0.074	111.078 - 112.235	0.236 - 0.243
290	0.085 - 0.087	135.335 - 136.536	0.206 - 0.212
300	0.100 - 0.102	164.362 - 165.756	0.181 - 0.186

5.2 原子・分子比の検討

次に原子・分子比を求める。現象論的なモデルとしての tail 成分と原子成分、分子成分を表すガウシアン関数を用いてフィッティングを行う。なお、分子による輝線は3種類が期待されるが(1.2.1章)、その値は非常に原子輝線エネルギーに近く、上手くフィッティングをおこなえない可能性がある。そこで以下のように条件4つに分け、それぞれでフィッティングをおこない、妥当性を評価した。

- (d) 各スペクトルに現象論的なモデルとしての tail 成分、連続成分、ガウシアン関数1つ(原子輝線を表す)
- (e) 各スペクトルに現象論的なモデルとしての tail 成分、連続成分、ガウシアン関数2つ(原子輝線、分子 3g 輝線を表す)
- (f) 各スペクトルに現象論的なモデルとしての tail 成分、連続成分、ガウシアン関数3つ(原子輝線、分子 2g 輝線、分子 3g 輝線を表す)
- (g) 各スペクトルに現象論的なモデルとしての tail 成分、連続成分、ガウシアン関数4つ(原子輝線、分子 2u 輝線、分子 2g 輝線、分子 3g 輝線を表す)

なお、分子輝線を表すガウシアンモデルの輝線エネルギーの値は、文献値より求めた原子輝線を基準とした比を用いてフィッティングをおこなった。

図5.2と表5.3は各条件でフィッティングを行った際のベストフィットのスペクトルとパラメータの値を示している。表5.3より、モデルを追加すると $reduced - \chi^2/d.o.f.$ は良くなる。しかし、 E_{Line} だけで見ると、(e)のガウシアン関数2つで行ったフィッティングが最も文献値に近い値となった。次に得られた値より、原子・分子比を求めることで、スペクトルの再現性を評価する。

表5.4は(e)(f)(g)の条件でフィッティングをおこなった際に得られた輝線強度比から求めた原子・分子比である。表5.2の値と比較すると、窒素に関しては条件(g)が高度280-290kmのモデル値と一致している。酸素に関しては条件(e)が高度110-120kmのモデル値と一致している。しかし、どちらも誤差が大きいことに注意する必要がある。以上より、ガウシアン関数を複数個もちいることで、地球大気中の窒素と酸素それぞれの原子・分子成分のモデルフィッティングを行うことができたが、その値は誤差も大きく、窒素または酸素のどちらかしか合わなかった。これはXISの低エネルギー応答の問題が本研究の手法では取り除けなかった可能性が高く、結論するまでには、さらなる低エネルギー応答の検証か、究極的にはより分解能の優れた観測が必要である。

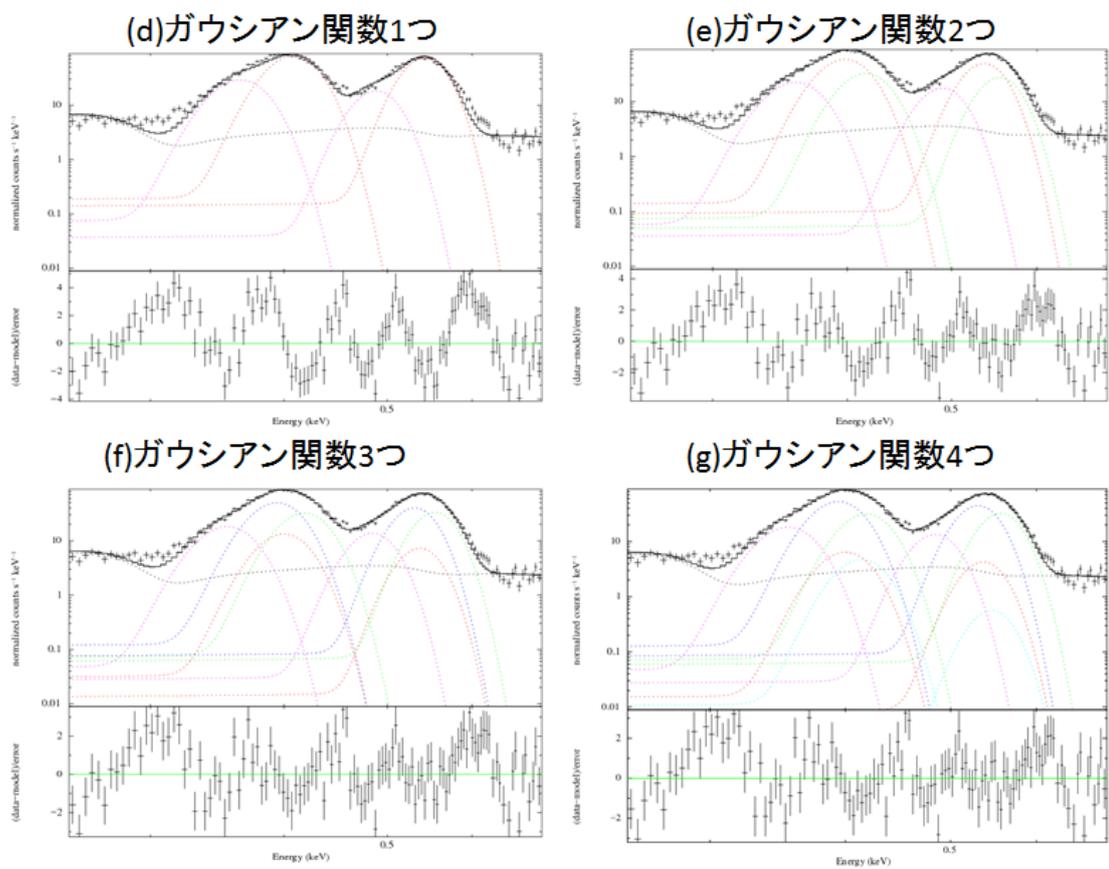


図 5.2: 各条件でフィッティングをおこなった際のベストフィットのスペクトル (d)(e)(f)(g)

表 5.3: 各条件でフィッティングをおこなった際のベストフィットのパラメータ (d)(e)(f)(g)。各成分の下にかっこで書かれた数字は文献値の輝線エネルギーの値を示している。

成分	Parameter	(d)	(e)	(f)	(g)
窒素原子 (0.3924)	E_{Line_N} [keV]	0.4060 ± 0.0003	0.3972 ± 0.0049	0.3998 ± 0.0049	0.3987 ± 0.0472
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K	0.8349 ± 0.0130	0.6120 ± 0.1722	0.1366 ± 0.2292	0.0660 ± 7.6163
窒素分子 2g (0.3866)	$E_{Line_{N2g}}$ [keV]			0.3939(比で固定)	0.3928(比で固定)
	σ [keV]			0(固定)	0(固定)
	K			0.5406 ± 0.3033	0.5745 ± 6.3931
窒素分子 2u (0.4056)	$E_{Line_{N2u}}$ [keV]				0.4121(比で固定)
	σ [keV]				0
	K				0.0457 ± 8.0112
窒素分子 3g (0.4095)	$E_{Line_{N3g}}$ [keV]		0.4145(比で固定)	0.4172(比で固定)	0.4161(比で固定)
	σ [keV]		0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K		0.3051 ± 0.2171	0.2964 ± 0.1304	0.2899 ± 6.6652
tail 成分	$E_{Line_{tail}}$ [keV]	0.3622 ± 0.0010	0.3576 ± 0.0017	0.3533 ± 0.0018	0.3527 ± 0.0026
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K	0.4296 ± 0.0135	0.3480 ± 0.0332	0.2958 ± 0.0285	0.2953 ± 0.0579
酸素原子 (0.5249)	E_{Line_O} [keV]	0.5405 ± 0.0003	0.5345 ± 0.0040	0.5345 ± 0.0035	0.5352 ± 0.0155
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K	0.6588 ± 0.0104	0.2773 ± 0.0975	0.0410 ± 0.0767	0.0242 ± 2.1430
酸素分子 2g (0.5192)	$E_{Line_{O2g}}$ [keV]			0.5286(比で固定)	0.5294(比で固定)
	σ [keV]			0(固定)	0(固定)
	K			0.1881 ± 0.0584	0.2091 ± 1.1634
酸素分子 2u (0.5342)	$E_{Line_{O2u}}$ [keV]				0.5447(比で固定)
	σ [keV]				0(固定)
	K				0.0048 ± 2.2401
酸素分子 3g (0.5441)	$E_{Line_{O3g}}$ [keV]		0.5540(比で固定)	0.5540(比で固定)	0.5548(比で固定)
	σ [keV]		0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K		0.1786 ± 0.0851	0.2183 ± 0.0688	0.2080 ± 0.7863
tail 成分	$E_{Line_{tail}}$ [keV]	0.4865 ± 0.0013	0.4889 ± 0.0025	0.4823 ± 0.0041	0.4820 ± 0.0048
	σ [keV]	0(固定)	0(固定)	0(固定)	0(固定)
	K	0.1022 ± 0.0037	0.0975 ± 0.0095	0.0792 ± 0.0079	0.0769 ± 0.0094
<i>reduced</i> - $\chi^2/\mathbf{d.o.f.}$		5.4678(579.58/106)	3.2238(335.27/104)	2.3207(236.71/102)	2.3103(231.03/100)

表 5.4: (e)(f)(g) の条件でフィッティングをおこなった際の原子/分子比

	(e)	(f)	(g)
\mathbf{N}/\mathbf{N}_2	2.006 ± 0.5798	0.1632 ± 0.2775	0.0726 ± 0.8073
\mathbf{O}/\mathbf{O}_2	1.553 ± 0.5461	0.1009 ± 0.1889	0.0573 ± 5.0797

第6章 まとめ

今回、我々は XIS の観測データを用いて、地球超高層大気の観測を試みた。その結果、昼地球大気からの窒素や酸素起源の輝線が得られ、それぞれの輝線幅は単一の原子状態からの輝線幅と比較して、明らかな広がりがあることを確認した。その広がりには左右非対称であり、今回の観測領域が非常に明るい昼地球であることを踏まえると、観測データ較正の不定性の影響が考えられた。そこで、天体観測時と異なる条件として可視光の流入と観測帯域が低エネルギーであることに着目し、電荷転送効率と光漏れ量補正について検討を行った。

電荷転送効率に関しては、XIS の観測領域を3つに分割し、tail 成分と輝線成分の中心エネルギー値の比較を行った。その結果、得られたエネルギー比に有意な差は無く、電荷転送効率の劣化は確認されなかった。次に、地球大気からの非常に強い可視光の流入により、光漏れ量補正が適正に行われていない期間がないかを調べた。今回用いた観測データの全領域に対して、光漏れ量補正が適正に処理されないほどの可視光の入射がないことを確認したが、そのような期間は無かった。以上の結果より、昼地球大気を観測する場合においても、天体観測時に用いるデータ処理を行うことで、十分に解析ができることが分かった。よって、地球大気の輝線幅の広がりには tail 成分として別途で評価することで、解析を行った。

地球大気から期待される特性 X 線は、窒素・酸素の原子状態および分子状態からの特性 X 線である。そこで現象論的なモデルとしての tail 成分とそれぞれの原子・分子の混合状態成分を表すモデルとして幅を持つガウシアン関数を用いてフィッティングを行ったところ、スペクトルを良く再現することができ、得られたデータから窒素/酸素比を求めたところ、NRLMSISE-00 Atmosphere Model とおおむね一致した。次に、地球大気の組成をより正確に再現するために、窒素と酸素、それぞれのスペクトルに tail 成分、原子成分、分子成分を表すガウシアン関数を用いて窒素・酸素の原子/分子比を求めたところ、窒素と酸素の両方が NRLMSISE-00 Atmosphere Model と一致する結果は求められず、誤差も大きいため、窒素・酸素の原子/分子比を求めることはできなかった。これは XIS の低エネルギー応答の問題が本研究の手法では取り除けなかった可能性が高い。

本研究より X 線天文衛星「すざく」の観測データを用いることで、原子と分子が混合状態である窒素と酸素の比を求めることができると分かった。さらに、それぞれの原子・分子成分を求めるには、さらなる低エネルギー応答の検証か、より分解能の優れた観測が必要である。

Reference

- [1] 永田武・等松隆夫(1973)『超高層大気の物理学』裳華房
- [2] 八木浩輔(1975)『原子核物理学』朝倉書店
- [3] 沼田佳介, 学士論文(埼玉大学 2017)
- [4] 山口弘悦, 修士論文(京都大学 2005)
- [5] 穴田貴康, 修士論文(東京大学 2006)
- [6] 片山晴善, 修士論文(大阪大学 1999)
- [7] 「すぎく」ファーストステップガイド第 4.0.3 版
- [8] 鶴剛, 松本浩典,Suzaku(Astro-E2)XIS Science FITS 確認書
- [9] 「なぜ宇宙で太陽を見るのか?」 <<http://hinode.nao.ac.jp/intro/science/reason.html>>
> 2018 年 2 月 2 日アクセス.
- [10] SUZAKU Technical Discription
- [11] 「The HEASARC Calibration Database」
< https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/caldb/caldb_intro.html >
> 2018 年 2 月 2 日アクセス.
- [12] Albert Thompson, Ingolf Lindau(2009) X-RAY DATA BOOKLET
- [13] Koyama,K.,Tsunemi,H.,Dotani,T.,Bautz,M.W, Hayasiga,K.,Tsuru,T.G.,et al.,”X-Ray Imaging Spectrometer(XIS)on Board Suzaku”,2007,PASJ,59,23
- [14] Mitsuda, K.,Bautz, M., Inoue, H.,et al.2007,PASJ,59,1
- [15] James F.Harrison,Daniel B.Lawson,Some Observations on Molecular Orbita Theory,2005,Journal of Chemical Education

謝辞

本修士論文を執筆するにあたり、ご協力くださった方々に深く感謝申し上げます。特に田代信教授と寺田幸功准教授には大変お世話になりました。ミーティングでは私の言葉足らずな発表にも、いつも分かりやすく解決策やコメントをして下さいました。また、本修論だけでなく、夏の学校や天文学会の際はご多忙のところ発表練習を見て頂いたり、休日にも関わらず添削をして頂いたりしました。毎回、添削から返ってきたものは真っ赤でしたが、とても勉強になりました。2年間、ご指導ありがとうございました。佐藤准教授と勝田助教授にも大変お世話になりました。佐藤准教授にはXISに関して勉強不足であった点を教えていただきました。勝田助教授には研究に興味を持っていただき、一緒に研究を進めたり、相談に乗って頂いたりしました。ご指導ありがとうございました。

また、XISチームの皆様にも大変お世話になりました。信川正順准教授、村上弘志准教授、森浩二准教授には研究が行きづまった際に、電子メールとテレビ会議で相談に乗っていただきました。また、年末のテレビ会議では修士論文の方針についてもアドバイスを頂きました。お忙しいところ、ご指導していただき本当にありがとうございました。

研究室の学生の皆様にも大変お世話になりました。沼田さんと相楽さんは一緒に大気チームを作り上げてきてくれました。沼田くんはとても優秀で、私と同時に研究を開始したにも関わらず、教えてもらうことが多かったです。相楽さんもとても優秀で、自分で調べてどんどん進め、私が教えることは少なかったです。私が修士論文を書くことができたのは、2人の支えがあったからです。ありがとう。そして、研究室同期の大清水くんと西山くんとは励まし合い、刺激し合いながら修士の2年間をともに歩んできました。大清水くんとはなぜか反発しあうことが多かったですが、M2で決め事などをする時はいつも引張って行ってくれました。西山くんは研究室生活でわからないことを相談すると、いつも優しく教えてくれ、私の心のよりどころでした。まだ一度も実現していないM2だけの飲み会、実現しましょう。矢部さんと加藤さんには研究のことから就職活動についても、アドバイスを頂きました。2人共とても話しやすく頼もしい先輩で、他研究室から来て心細かった私にとって、とても心強かったです。現M2は先輩方がいないと集まれないので、また飲み会ができたと思います。永吉さんには研究者としての在り方を教えていただきました。短い間でしたが、海外で培われたそのストイックさはとても刺激になりました。陰ながら尊敬しています。勝倉さんには時々研究の相談に乗って頂きました。こんなもの分からないの？と草を生やしつつ、懇切丁寧に教えて下さいました。とても話しやすく、いつも頼りにさせていただきました。今井くんはXISの解析を大学時代に行っていたということで、解析について教えてもらうことがありました。解析について相談できる人がいなかったのも、とても頼もしかったです。小高くんはとても物知りで、色々なことを布教してくれました。また、様々な相談にも親身に乗ってくれ、何事にも頼もしい後輩でした。砂田くんは私のおかしな点をいつも指摘してくれました。この2年間で私が正しい箸の持ち方になることができたのも、砂田くんのおかげです。今もこの謝辞を読んで、たくさんの指摘をしていることなのでしょう。高橋くんとは健康論について、よく話しました。ただ、お互い長続きしないですね。また良いダイエット法を見つけたら教えて下さい。最後になりましたが、大学院に進学させて頂き、ここまで自分を支え続けてくれた家族に感謝の意を表して謝辞と致します。