

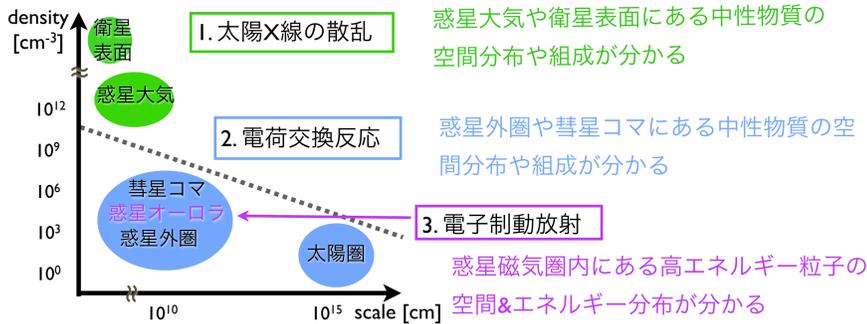
すざく衛星による惑星X線の観測



石川久美、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大)、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、
藤本龍一 (金沢大)、三好由純 (名古屋大)、寺田直樹 (東北大)、内山泰伸 (スタンフォード大)、二穴喜文 (IRF)

1. X線による惑星科学

X線による太陽系天体の観測は2000年代に入り、Chandra (米) や XMM-Newton (欧)、すざく衛星の登場によって急速に発展した。これまでにX線が検出された太陽系天体は、惑星 (金星、地球、火星、木星、土星) と衛星 (月、ガリレオ衛星)、彗星、太陽圏である。その放射メカニズムは3つに分類できる。



- (1) 惑星大気 (disk) 中の中性物質による太陽X線の弾性・蛍光散乱
- (2) 惑星外圏や彗星ガスのような希薄な大気中の中性物質との電荷交換 (CX : Charge eXchange)
- (3) 惑星オーロラ中で高エネルギー電子が中性物質と衝突することによる制動放射

これらのメカニズムは惑星大気やその周辺環境と密接に関係しているため、惑星大気や磁気圏中の密度や空間分布などの詳細な情報を得ることができる。また、地球近傍からのX線観測は、時期を変えた観測を行うことが可能であるため、時間変化を含めた情報を得ることができる。以上のことから探査衛星による「その場」観測との相補的な役割を担うと期待される。

2. 「すざく」による観測

「すざく」搭載のX線CCD (XIS) は、低バックグラウンドと高いエネルギー分解能、優れたエネルギー応答により、広がった天体に対して高い感度を持つ。希薄で広がった惑星外圏や磁気圏などの観測に最適である。

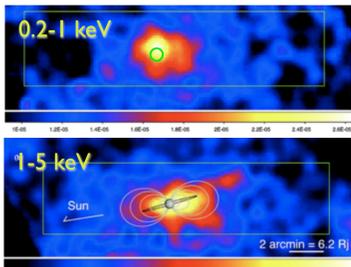
木星 : 広がったX線放射の発見

角度分解能に優れた Chandra で放射場所が特定され (Gladstone+ 02, Nature)、有効面積に優れた XMM-Newton により場所ごとの放射機構が明らかになってきた (Branduardi-Raymont+02, A&A)。

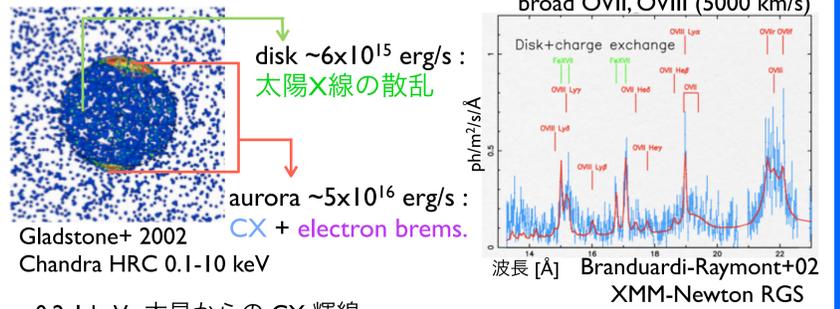
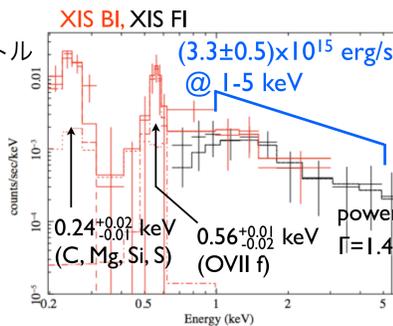
「すざく」の結果 (Ezoe+ 2010, ApJL)

観測日 : 2006/02/24~28, exposure 160 ks. 視野内を ~1 arcmin/day で移動するため 4 pointings で観測された (PI : Elsner)。木星のスペクトルは半径3分の円、バックグラウンドは木星周囲の半径3-6分の円環から抽出した。

■ XIS イメージ
すざくと木星の軌道運動を補正 & 点源除去



■ スペクトル



0.2-1 keV : 木星からの CX 輝線

1-5 keV : 木星周辺からの non-thermal な広がった放射

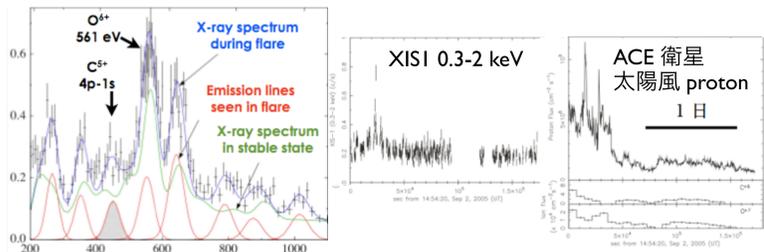
磁気圏内の MeV 電子の太陽光子による逆コンプトン散乱で説明可能することができる。ただし、放射を説明するのに必要な >50 MeV の電子密度は 0.005 /cm³ であり、探査衛星による観測結果に基づく理論モデル (Divine&Garret 1983) の >7倍多くなる。

地球 : 外圏密度モデルへの本格的応用を示唆

太陽風中の高階電離イオンと地球外圏の中性物質との電荷交換 (SWCX : Solar Wind CX) によるX線放射は軟X線バックグラウンド (0.1-1 keV) に寄与するとされる (Dennerl+ 1996)。これは全ての軟X線観測の foreground emission として重要であり、ROSAT (独) や Chandra、XMM-Newton により確認されている。

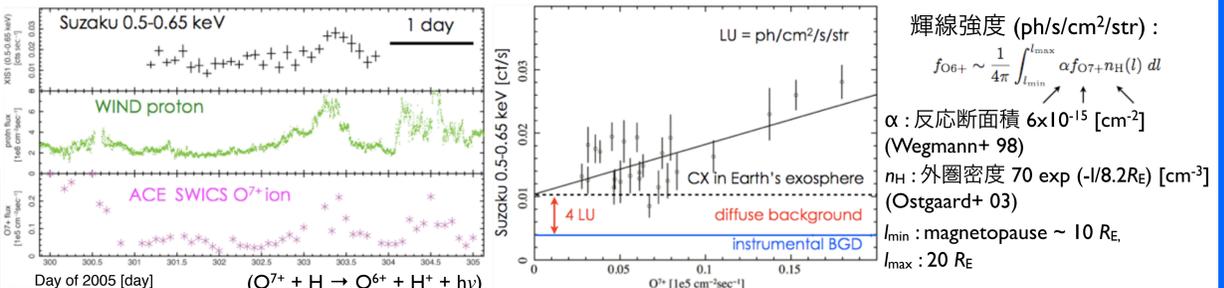
「すざく」の結果 1 (Fujimoto+2007, PASJ)

観測日 : 2005/09/02~04, exposure 110 ks.
North Ecliptic Pole (RA 272.8 Dec 66.0, J2000) 方向を
観測中に増光が確認された。視線方向の magnetopause の高さ 1~8 地球半径、という地球近傍で反応していると考えられる。



「すざく」の結果 2 (Ezoe+2010, PASJ)

観測日 : 2005/10/28~30, exposure 100 ks. Galactic Ridge (RA 281.0 Dec -4.1, J2000) から強い酸素輝線 (560±3 eV, 11±2 ph/cm²/s/str)。forbidden line > resonance より SWCX による放射と考えられる。太陽風イオンの time lag 解析の結果、X線輝線との間に時間相関を発見。



計算値は観測値の ~1/10 となり、一致せず。原因として地球外圏モデルの不定性があり、予想以上に太陽風が magnetopause 内に侵入しているなど考えられる。「すざく」による SWCX の研究は、地球外圏や太陽風の磁気圏内の輸送への理解に役立つことが示された。

火星 : 太陽活動極小期での外圏密度に初めての制限

表面重力 0.38 G, 磁場 0.01 G (地球の 1/10)。過去は温暖湿潤な気候であったが、現在は寒冷乾燥な環境下にある。この原因の一つとして大気流出があり、火星外圏の密度を知ることは流出の様子を知るヒントとなる。理論モデルでは太陽活動極小期は極大期の~10倍密度が高くなる (Krasnopolsky+96)、という予想はあるが観測的検証には至っていない。

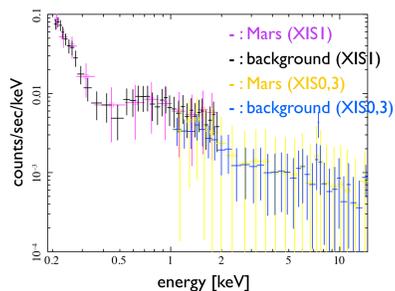
これまでの結果

Chandra による観測で火星 disk からのX線放射と、周辺からの広がった放射の兆候が発見され (Dennerl+ 02, A&A)、

XMM-Newton により~3火星半径まで広がった領域からの放射が検出された (Dennerl+ 06, A&A)。

「すざく」の結果 (Ishikawa+ in prep)

観測日 : 2008/04/03~05 (PI : Ezoe), exposure 82 ks. 太陽活動極小期の火星を初めて観測した。



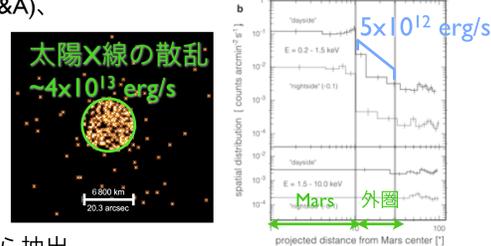
視野内を ~27.2 arcmin/day で移動するため 27 pointings で観測された。

■ イメージ : 火星の位置からの放射は検出されなかった。

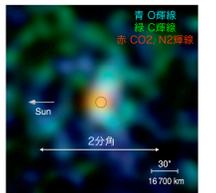
■ スペクトル : 火星を半径3分、バックグラウンドを火星周囲の半径3-6分から抽出。

火星からの有意な放射は検出されなかったが、酸素バンド (0.5-0.65 keV) でのX線フラックスに 4.3x10⁻⁵ ph/cm²/s の 2σ 上限をつけることができた。太陽活動極小期では、太陽X線が極大期の0.1~0.01 倍と弱まるため、disk からの放射はほぼ無視でき、この値は外圏からのX線の上限となる。太陽風プロトンや地球-火星、太陽-火星の距離を考慮して、太陽活動が活発な時期の観測 (Chandra, XMM) での外圏X線と比較すると、「すざく」観測時における外圏密度は XMM-Newton 時の <6.3倍、Chandra の <93倍と見積もられた。これらはX線を用いて、太陽活動極小期における外圏密度を初めて制限する結果となった。

Chandra ACIS-I (Dennerl 2002)



XMM-Newton RGS



SWCX ?

惑星X線の展望

2014年打ち上げ予定の Astro-H 衛星 (日米欧) 搭載のX線マイクロカロリメータ (SXS : Soft X-ray Spectrometer) の優れたエネルギー分解能 (<7 eV) による観測や、ERG (日 : 2014年打ち上げ予定) による地球磁気圏プラズマ観測、探査衛星による木星観測 (欧米日 : EJSM 計画) などにより、詳細な惑星大気の組成や分布について更なる知見がもたらされることが期待される。