

# X線天文衛星「すざく」で見た惑星

江 副 祐一郎

〈首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1〉  
 e-mail: ezoe@phys.metro-u.ac.jp



太陽系の惑星はわれわれに最も近い天体であるにもかかわらず、その大気や磁場環境にはまだまだ謎が多い。X線観測の技術の向上によって、惑星からのX線を詳しく検証できるようになってきた。地球周回のX線天文衛星を使ったりリモートな観測は、探査衛星による直接の観測と相補的に用いることができる。筆者らは広がったX線放射に対して最高の感度を誇る「すざく」衛星のデータを用いて木星の内部磁気圏や、地球および火星の超高層大気である外圏の研究を行っている。「すざく」で明らかにした惑星の知られざる一面を紹介する。

## 1. 惑星からのX線

太陽系には八つの惑星（水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星）があり、肉眼や望遠鏡でその姿を楽しむことができる。惑星からのX線が検出されたのは、1950年代の地球のオーロラが最初であった。その後1979年に木星に一致した放射が米インシュタイン衛星によって検出され<sup>1)</sup>、1990年代には太陽から出た太陽風が星間空間を満たす太陽圏と、地球の超高層大気である外圏からのX線が示唆された<sup>2)</sup>。劇的に研究が進んだのは1999年に打ち上げられた米チャンドラ衛星によってである。高解像度のX線イメージによって、木星、地球からのX線が確認され<sup>3),4)</sup>、さらに金星、火星、土星からのX線が新たに発見された<sup>5)-7)</sup>。同時期に打ち上げられた欧XMM-Newton衛星も木星、地球、火星、土星のX線スペクトルから放射メカニズムの解明に威力を発揮した<sup>8)-11)</sup>。

X線は0.1-10キロ電子ボルトという高いエネルギーをもつ電磁波であり、宇宙からのX線といえば、高密度天体、超新星残骸、銀河団といった天体を思い浮かべる方も多いと思う。では、せいぜい数百度の表面温度しかない“冷たい”惑星

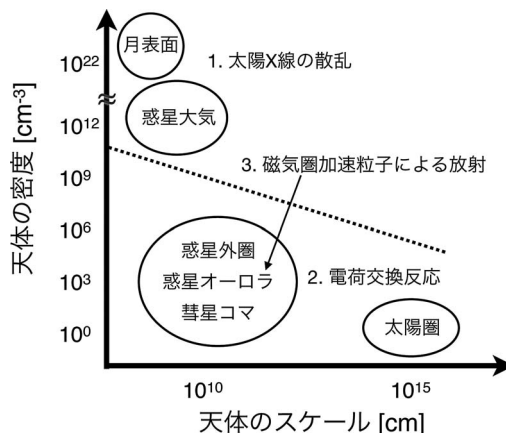


図1 太陽系の天体のスケールと密度によるX線放射の分類。点線は1と2の境界を表す。

からX線が出ているのはなぜであろうか。これまでの観測によれば、惑星のX線放射メカニズムは大きく三つに大別できると考えられる。図1に分類を示す。

一つ目は太陽からのX線の散乱である。密度が大きくコンパクトな惑星の大気や衛星の表面では、太陽のX線が吸収され、輝線として再放出されたり弾性散乱される。これはすべての惑星や月などの衛星で見ることができる。

二つ目は電荷交換反応と呼ばれるプロセスである。これは太陽風などに含まれる多価重イオン

が、広がった希薄な大気と衝突して電子を奪うプロセスである。奪われた電子はイオン中で脱励起を起こして、X線で輝線を放出する。これは彗星コマからのX線に対して提唱され、その後、地球や火星の超高層大気である外圏や木星の極域（オーロラ）からのX線輝線の成因と考えられるようになった。

三つ目は惑星の磁気圏で加速を受けた非熱的なエネルギー分布をもつ電子による放射で、磁場の強い惑星である地球や木星のオーロラから観測されている。

筆者が思う惑星からのX線研究の最大の魅力は、この分野がここ10年で急激に進んだ分野であるがゆえ、まだ未知の放射が隠されている可能性があることである。たとえばX線がまだ発見されていない誰もが思いつく惑星は、水星である。X線観測は地球の近くを周回する衛星を用いるため、太陽からの離角が小さい水星は観測が難しく、まだ観測すらされていない。天王星、海王星からのX線も未発見である。これらは観測は可能なのだが、太陽から遠く太陽からのX線やイオンのフラックスが小さいため、暗いと思われる。いずれも観測が進めばX線が発見されるであろう。

また重要なことに、惑星を調べるうえでの王道である探査衛星が直接「その場」に行きつけて精緻に、ある特定の場所のスナップショットを取得できるのに対して、リモートなX線による観測は惑星の大気や惑星の磁場に付随した高エネルギー粒子の全体像を、長期にわたってモニターすることが可能であるため、お互いに補い合う観測の手段となりうる。

筆者は大学院の時代に米チャンドラ衛星の金星論文を読み、その美しいイメージと、惑星大気をモデル化したシミュレーションとデータ的一致に深く感銘を受けた。が、当時は手持ちのデータもなかったため、すぐに忘れて5年の時が過ぎた。

状況が変わったのは、2005年にX線天文衛星

「すざく」<sup>12)</sup>が打ち上げられてからである。本誌にたびたび紹介されているとおり、「すざく」に搭載されているX線CCD検出器のバックグラウンドは、近地球軌道の低い放射線フラックスと、検出器チームの徹底したキャリブレーションのおかげで、他のどの衛星よりも低くまた安定している。さらにエネルギー分解能も良いため、1分角以上に広がったX線では「すざく」の独壇場となる。そこで筆者は惑星やX線の研究者と一緒に「すざく」のデータを使って、念願の惑星X線の世界に足を踏み入れた。本稿ではこれまでに得られた結果をかいつまんでご紹介させていただく。

## 2. 木 星

木星は太陽系で最も大きな惑星であり、水素を主成分とするガスからなる。半径は71,500 kmと巨大だが、自転周期は10時間と短く、惑星の中心にあると考えられる金属水素の高速の自転によって非常に強力な磁場をもつ。磁場の強度は木星表面で4 Gaussと地球の10倍ほどであり、その磁気圏（惑星の磁場が支配的で、太陽風プラズマが直に侵入しない領域）は数百木星半径にも及ぶ。さらに木星の衛星イオから吹き出す火山ガスがプラズマ源となり、衛星イオの軌道にプラズマがドーナツ（トーラス）状に存在している。高エネルギー天体物理の研究者には、まさに垂涎ものの天体と言えよう。

§1で述べたように、木星からのX線は地球に次いで初期に見つかった。しかし当時の観測技術では放射源およびメカニズムを特定することはできなかった。2000年代に入り米チャンドラ衛星が見事な木星のX線イメージを取得した<sup>3)</sup>（図2左）。次いで欧XMM-Newton衛星によって、木星の極とそれ以外の場所の統計の良いX線スペクトルが得られ、放射メカニズムの理解が進んだ（図2右）。オーロラからのX線は、磁気圏で加速された電子の制動放射と加速イオンによる電荷交換反応の重ね合わせであると考えられ、惑星大

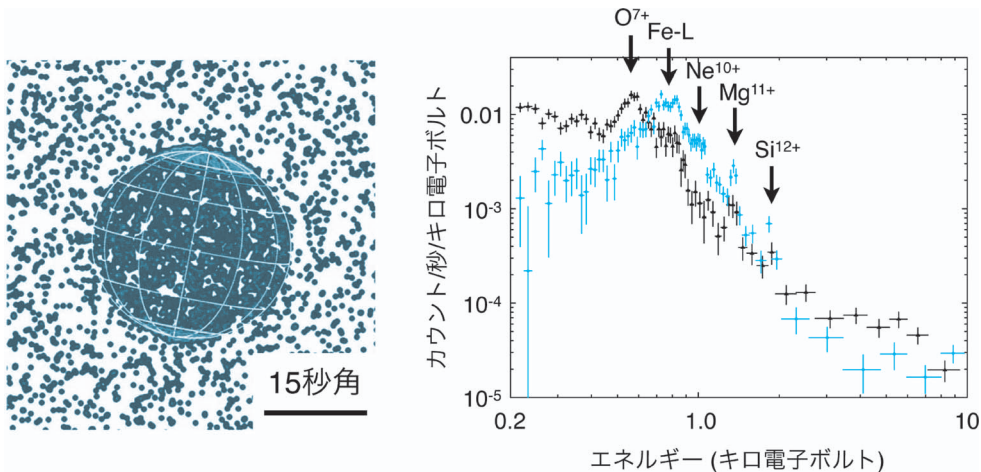


図2 (左) 米チャンドラ衛星による木星の0.1-10キロ電子ボルトの光子を積分したX線イメージ<sup>3)</sup>。(右) 欧XMM-Newton衛星による木星のX線スペクトル(黒: 北極, 青: 極以外)<sup>13)</sup>。さまざまなイオンからの輝線を矢印で示した。

気からの放射は太陽X線の散乱であると考えられている<sup>8), 13), 14)</sup>。

では「すざく」で見るとどんな新しいものが見えるだろうか。そこで注目したのが木星の放射線帯(バン・アレン帯)である。特に木星から約6木星半径以内の非常に磁場が強い放射線帯に着目した。この領域にはこれまでに3機の探査衛星・プローブ(パイオニア10号・11号, ガリレオプローブ・オービター)が投入され、キロ電子ボルトから最大で数十メガ電子ボルトに達する電子を発見してきた<sup>15)</sup>。また地上やカッシーニ探査機からの電波による観測でも、数十メガ電子ボルトの電子が磁力線の周りを運動する際に出るシンクロトロン放射が観測されており<sup>16)</sup>、太陽系惑星で最大の粒子加速の現場と考えられている。しかし、強力な電子に加えイオンに満ち満ちた環境であるがゆえ、探査衛星を飛ばすのはそもそも難しく直接見たデータは限られる。加えてシンクロトロン電波を使ったリモートで見られる領域も、磁場の強い木星のごく近傍(～2木星半径以内)に限られることから、このような高エネルギー電子がどのように加速され、どのように空間的、エネルギー的に分布しているのかよくわかっていない。

そこで筆者らは「すざく」の公開データを用いて、放射線帯からのX線を検証することにした。データは2006年2月に取得されたもので、4日間にわたる長期の観測である。まず直面した問題は、木星は地球から近いため、その固有運動のために視野の中を動く(観測時では約1分角/日)ことである。可視光のようにスナップショット的に短時間の露光で画像を作ることができればいいのだが、木星X線は暗いため、数日にわたって積分しないとS/N比よく見ることはできない。

そこでX線イベントが検出された時刻と位置の情報を使って、その時刻の木星の天空上での位置から木星が常にイメージの中心となるような「静止座標イメージ」を作ることによって、この問題を解決した。

次に気がついた問題が、視野内に必ず存在する木星とは関係ない背景の点源の除去である。木星のX線は暗いため、これを行わずに単純に静止座標イメージを作ると、これらの点源がノイズとなって木星からの放射と紛らわしい。そこで筆者らは点源検出ソフトを用いて、点源と思われる約20個の領域を一つひとつ除去した。そして抜いた領域の露光時間の補正をイメージ上で行ったうえ

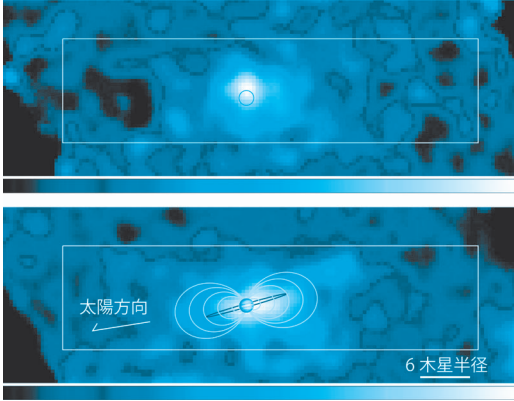


図3 「すざく」で取得した木星のX線イメージ。(上) 0.2-1キロ電子ボルトの光子を積分したもの。四角は断面プロファイルを求めた領域(図4)。丸は木星のサイズを表す。(下) 左図と同様、ただし1-5キロ電子ボルトのもの。カッシーニ衛星による木星の可視光イメージ、木星の磁力線(実線灰)、および衛星イオの軌道(実線黒)を重ねた。

で、静止座標系イメージを作った。

得られたX線イメージを図3に示す。エネルギーによる違いを見るため二つのエネルギーバンドで積分したものを示した。0.2-1キロ電子ボルトの軟X線では木星と一致した位置に点状の放射が見られるが、1-5キロ電子ボルトの硬X線では広がった放射が見られる。驚いたことに、この広がりは何と木星の放射線帯や衛星イオの軌道とよく一致する。

この広がりをもっときちんと見るため、カウント数を図3の横軸に投影した断面プロファイルを作ったのが図4である。軟X線の広がりは、「すざく」の望遠鏡の結像性能(像の広がり)とよく一致しており、木星本体からの放射と考えられる。なお図2(左)と図3(上)に差があるのは「すざく」に比べ、米チャンドラの空間分解能が200倍良いためである。

硬X線では望遠鏡の結像性能よりも明らかに広がった成分がある。これを再現するため、木星の周りに直径で4×12木星半径だけ広がった楕円のX線放射を仮定して、イメージをシミュレ

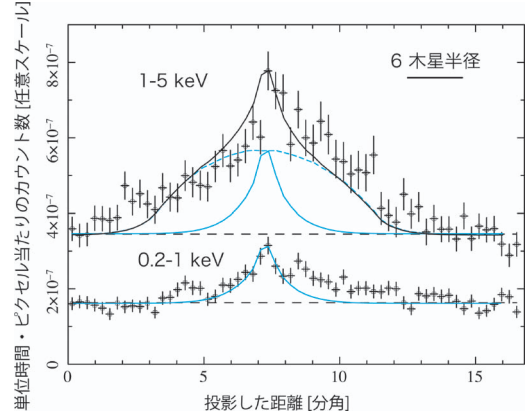


図4 「すざく」で取得したX線イメージの断面プロファイル。実線(青)は「すざく」の望遠鏡の結像性能を考慮した木星本体の広がりを表す。点線(青)は直径4×12木星半径に広がった楕円の放射のシミュレーションであり、実線(黒)は木星本体および広がった放射を足したプロファイル。点線(黒)はバックグラウンドレベルを表す。

ーションすると図のようによく再現することができた。つまり、世界で初めて木星放射線帯からの広がったX線の存在が示唆されたのである。

ここで図4からわかるとおり、この広がった放射は「すざく」の検出器バックグラウンドのせいぜい2-3倍程度と暗い。このような低い表面輝度の放射は従来の米欧の衛星では検出が難しく、「すざく」でしか精度よく検出できないと考えられる。「すざく」は米チャンドラ衛星ほどの結像性能をもたないかわりに、いわゆる光学系のF値の大きな明るい望遠鏡を選択した結果、この放射を捕らえることができたのである。

ではこの放射の起源は何であろうか。そのヒントはX線スペクトルに求めるのが常套手段である。そこで広がった放射の領域を積分したスペクトルを解析したものを図5に示す。スペクトルは輝線と巾関数の合計でよく再現することができた。巾関数の光子指数(傾き)は1.4程度と非常にフラットであり、非熱的な放射を強く示唆する。1-5キロ電子ボルトの光度は330メガワットに達

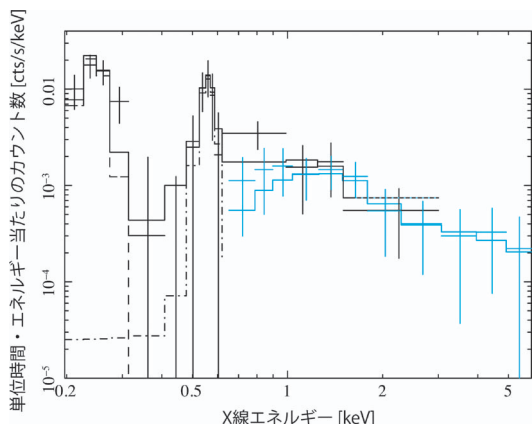


図5 「すざく」で取得した広がった X 線放射のスペクトル。黒と青はそれぞれのエネルギー範囲に高い感度をもつ X 線 CCD で取得したものの。実線はデータを最もよく再現したモデル。輝線放射と巾関数の重ね合わせからなる。

し、これまで観測されてきた木星オーロラからの値の 2-3 倍程度になる。

スペクトルから示唆されるように、放射が非熱的な加速粒子によるものと仮定すると、考えられるメカニズムは (1) テラ電子ボルトの電子によるシンクロトロン放射, (2) キロ電子ボルトの電子による制動放射, (3) メガ電子ボルトの電子による逆コンプトン放射の三つである。このうち (1) で必要とされるような高エネルギー電子はこれまで観測例がない。またエネルギーが高すぎて木星の磁気圏に閉じ込めることは不可能である。(2) のような低エネルギー電子が正体とすると、木星の近傍に満ちているイオからの火山ガス (主に硫黄) と衝突して強い硫黄の輝線を 2.3 キロ電子ボルトの付近に出すはずである。しかし、そのような兆候は見られていない。

よって残る可能性は (3) しかない。過去に観測例のある数十メガ電子ボルトの電子がその正体とすると、こうした電子は太陽からの可視光の光子と相互作用して、X 線を出すまでにたたき上げることが可能である。しかし、X 線の光度を説明するのに必要な電子の密度は、見かけの放射領域か

らざっと見積もると従来の探査衛星の結果に基づくモデルよりも 1 桁以上多い。これに対して明確な答えはまだ得られていないのだが、シンクロトロン電波の強度は数倍程度の時間変化が見られるため、今回は都合よく密度の濃い時期を見たのかもしれない。またあまり面白くはないのだが、実は「すざく」の望遠鏡では分解しきれなかった暗い背景点源が寄与している可能性もある。

筆者らはこうした疑問点を明確にするには、今後さらなる「すざく」の観測が必要になると考え、追加の観測プロポーザルを提出している。仮にこれが本当に逆コンプトン放射であれば、これは太陽系で初めての例となるうえ、探査衛星などで直接観測の難しい惑星の放射線帯の活動をモニタリングする新たな手段となるかもしれない。ご興味のある方は筆者らの論文<sup>17)</sup>をご一読いただきたい。

### 3. 地 球

次なる例はわれらが地球である。§1 で述べたとおり、地球からの X 線で最初に見つかったのは地球の磁力線に沿って地球の極に降り注ぎオーロラを引き起こす、非熱的電子による放射である<sup>18), 19)</sup>。次いで見つかったのが太陽からの X 線の地球大気による散乱である<sup>20)</sup>。これは地球近傍を飛ぶ衛星が、昼側の地球を見ると観測できるため、検出器のエネルギーキャリブレーションなどに使われるが、通常は天体からの X 線を見る際の邪魔者として嫌われている。さらに雷やスプライトからの短期の X 線や  $\gamma$  線の放射が米 CGRO 衛星などで観測されており<sup>21)</sup>、理研などの研究者が研究を進めている<sup>22)</sup>。

筆者らのグループが注目しているのは、これらの地球本体からの X 線ではなく、はるか彼方にもやもやと存在する外圏 X 線である。外圏は上空数百 km 程度から数十地球半径に広がっており、密度は 2 地球半径では約  $1,000 \text{ cm}^{-3}$ 、10 地球半径では  $20 \text{ cm}^{-3}$  ほどという非常に希薄な大気で

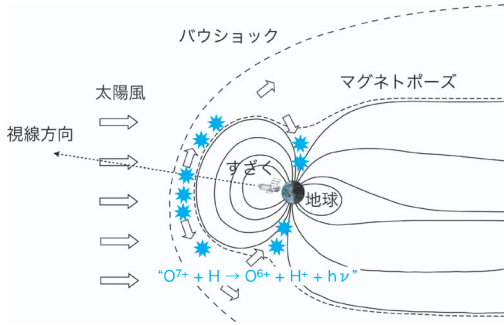


図6 地球外圏からのX線の模式図。実線は地球磁場、矢印は磁場にトラップされた太陽風の動きを表す。なお「すざく」の視線方向は、銀河面の観測時<sup>23)</sup>のもの。星印は過去の観測などから外圏X線が定常的に強いと考えられる場所。反応式は外圏X線で代表的なO<sup>6+</sup>イオンからのX線輝線の放射プロセス。

ある。

外圏からのX線は独ローサット衛星の全天サーベイ中に正体不明のノイズとして発見された成分<sup>9)</sup>の一部を説明するものとして、同じころに見つかった彗星のX線からの類推で、太陽風との電荷交換反応ではないかと指摘された<sup>23)</sup>。図6に模式図を示す。その後、米チャンドラ衛星の月の夜側の観測（月を遮蔽物として地球と月の間の放射のみを見た）や<sup>4)</sup>、欧XMM-Newton衛星の観測によって<sup>9)</sup>、外圏がX線源であることがほぼ確立された。

外圏からのX線は、放射源が地球を取り巻いていることから基本的に観測する視野全面にのっぺりと広がっている。すなわち広がったX線に対して感度の高い「すざく」にぴったりなのである。

期待どおり、「すざく」は外圏X線が確かに電荷交換であることに大きな役割を果たす成果を上げている<sup>24)</sup>。本誌でも2007年にすでに紹介されたとおり、藤本らは明るい天体がないバックグラウンド領域の観測中、X線の増光を発見した。その変動は太陽風の増加と一致しており、またスペクトルを見るとX線輝線が増加していた。輝

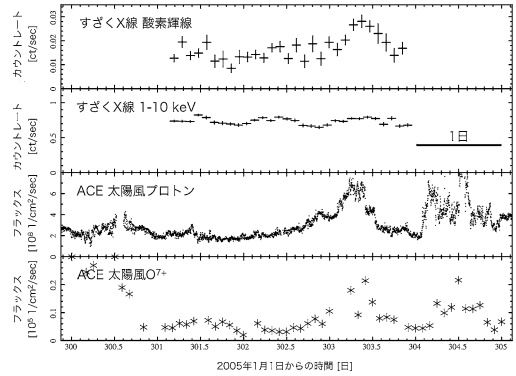


図7 「すざく」の銀河面の観測中のX線ライトカーブと太陽風フラックスの比較。最上段は6階電離した酸素イオンO<sup>6+</sup>からのX線輝線のエネルギーバンドを積分したもの、二段目はバックグラウンドが支配的な1-10キロ電子ボルトのX線ライトカーブ、三段目は太陽風のプロトンフラックス、最下段は太陽風のO<sup>7+</sup>イオンのフラックス。

線の中には通常のプラズマでは見られない、主量子数の多い状態からの遷移輝線が見つかった。

ここで電荷交換反応によるX線は多価イオン中を電子が脱励起する際に生じるため、輝線として放出される。また中性ガスから奪われた電子はエネルギーポテンシャルが浅い主量子数の大きな状態に遷移するため、宇宙でよく見られるプラズマからの輝線とは違ったエネルギー分布を示す。「すざく」が見つけたこの現象はまさに電荷交換の理論と一致していた。これにより外圏X線が太陽風との電荷交換によるとする説が決定的となったのである。

この成功を受け、筆者らはさらに踏み込んで電荷交換を使った惑星物理の研究へと進んでいる。たとえば惑星大気と太陽風が相互作用することによって惑星から大気が奪われる大気散逸、さらには太陽風がどのように惑星の磁気圏に流入し、惑星の近くまで輸送されるかという太陽風の侵入過程・経路の問題は、惑星物理の重要な課題として認識されている。

筆者らは「すざく」の全公開データを使って地

球の外圏 X 線の兆候を探し、さまざまな衛星の太陽風や地球磁場のデータを併用することで、これらの問題に迫ろうとしている。

一例として「すざく」の銀河面の観測データで見つかった、外圏 X 線の時間変動を図 7 に示す<sup>25)</sup>。酸素輝線のエネルギーバンドの光子を積分したライトカーブは 2 倍程度の変動するのに対して、1-10 キロ電子ボルトのバックグラウンドが支配的なエネルギーバンドは全く変動を示していない。酸素輝線は太陽風の観測衛星 ACE で得た太陽風酸素イオンの変動と非常に良い相関を示しており、太陽風との電荷交換が起源であると考えられる。

興味深いことに、このときの「すざく」の視線の向きは図 6 に示すとおり、赤道面に近かった。これは藤本らによる観測方向と約 90 度の角度をなす。このような方向では太陽風は地球の磁場でバリアーされ、地球の近傍まで近づくことができない。一方、磁気圏の界面（地球の磁場の磁気圧と太陽風プラズマの圧力の均衡点）から衝撃波面までの間には、シースと呼ばれる遷移層領域が存在し、太陽風プラズマの密度が惑星間空間よりも数倍高くなっている。今回観測された外圏 X 線は、比較的密度が高いシースのプラズマが、電荷交換反応を起こした結果と考えられる。しかし、シースは地球から 10 地球半径ほど離れており、外圏の大気密度は  $10 \text{ cm}^{-3}$  程度と低いため、これまでの外圏 X 線の理論では「すざく」で観測されたような強い X 線は出ないと考えられていた。

筆者らはそこで得られた太陽風のイオンフラックスと X 線の強度を用いて、視線方向の外圏の密度を、X 線データから、筆者らの知る限り初めて定量的に推定した。その結果、やはり必要な外圏の密度は従来のモデルよりも 1 桁高いことがわかった。外圏の大気モデルには不定性があることが指摘されており、今回の観測時には平均的な密度よりも濃い状態だったのかもしれない。または思いもかけない太陽風の磁気圏への侵入経路があ

るのかもしれない。今後はこうした検証をいろいろな視線方向に関して進めることで、太陽風と相互作用する地球外圏のダイナミックな姿を明らかにしたい。

## 4. 火 星

最後に紹介するのが火星である。火星は半径 3,400 km、自転周期は 1.03 日で表面重力は地球の 1/3 ほどと小さい。また惑星スケールの固有磁場をもたない。探査衛星の画像などでご存知のとおり、火星は現在は砂漠化した寒冷で乾燥した気候であるが、昔は水が存在し、温暖湿潤であった可能性があると考えられている。もしそうだとするとこの気候変動はなぜ生じたのだろうか。有力な説は、地球や木星と違って磁気圏が弱いため、太陽 X 線によって電離された火星の外層大気（すなわち外圏）が、太陽風（要は高速イオン流）と相互作用して大気が散逸したというものである。こうした現象はいまなお続いていると考えられ、火星からの大気散逸および大気進化の解明は日本の「のぞみ」衛星や現在、提案されている MELOS 衛星など多数の火星ミッションの目標となっている。

火星からの X 線は 2002 年に米チャンドラ衛星で初めて発見され、太陽 X 線の散乱が支配的であると考えられた。図 8(左) にイメージを示す。ここで図 8(右) のように X 線の広がりを観察すると、実は 1-3 火星半径あたりに広がった成分が存在することに気がつく<sup>5)</sup>。これはもしかすると地球で見られたような外圏と太陽風の電荷交換による X 線ではないか、そのような考えのもと、欧 XMM-Newton 衛星で追観測が行われ、1 分角程度に広がった放射が火星の周りに示唆された<sup>10)</sup>。しかしながら、これらの衛星はバックグラウンドが高く、広がった放射の感度が十分でないため、本当にこの放射が外圏からの X 線か、さらにはどこまで広がっているのか、決定的な答えは出ていない。

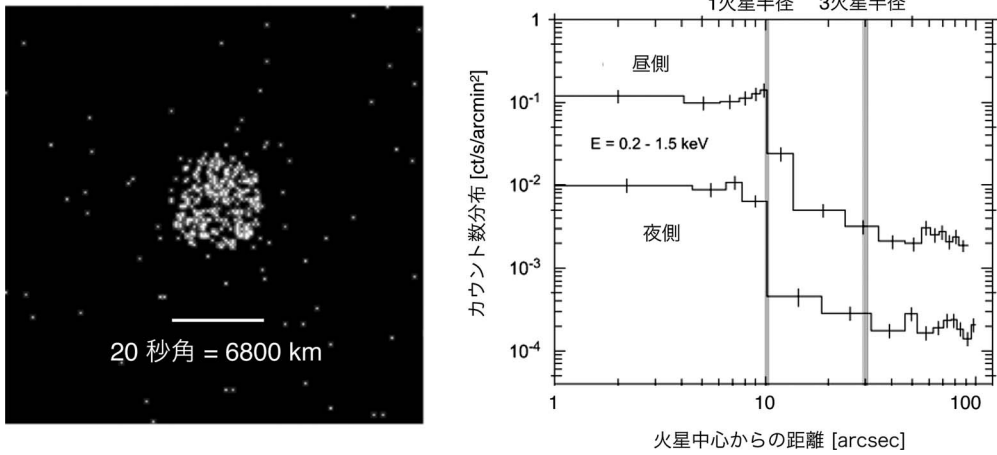


図8 (左) 米チャンドラ衛星による木星の0.4-0.73キロ電子ボルトの光子を積分したX線イメージ<sup>5)</sup>。(右) 同じくチャンドラ衛星による0.2-1.6キロ電子ボルトの光子を積分した火星を中心としたX線の動径分布。

広がった放射そして電荷交換とくれば「すざく」の独壇場である。そこでこうした状況を打破するため、筆者らは2008年4月に「すざく」による観測を行った。この観測には二つの「世界初」があった。一つは太陽活動極小期に火星を見た最初のX線観測であったこと、もう一つは火星の探査衛星マーズエクスプレスに搭載された太陽風の測定装置との同時観測であったことである。つまり、火星近傍での太陽風フラックスを正確に知ることによって、地球で行ったような詳細な密度推定が可能であると考えられる。

太陽活動極小期であることは「すざく」にとっては二つのメリットがある。一つは太陽X線が桁違いに弱まるため、火星本体からの放射が無視できるほど弱くなることであり、外圏X線のみを選択的に見ることができる。二つ目は、理論的には太陽活動極小期には太陽X線や極端紫外線が弱まるため、火星の外層大気の散逸率が下がり、散逸せず残った外圏大気の密度が最大で10倍高くなるという予測があったことである<sup>26)</sup>。この理論が正しければ、チャンドラ衛星の観測よりも強い外圏X線が期待できる。

こうした期待に胸を膨らませて観測を行ったのだが、残念ながら火星からの有意なX線は検出

されなかった。予想よりも火星外圏は暗いようである。酸素輝線のエネルギーバンド(0.5-0.65キロ電子ボルト)でのカウントレートの3シグマ上限値と太陽風フラックスを使って、外圏密度は太陽活動極小期でも極大期の約4倍以下と見積もることができた。すなわち「すざく」による高感度の観測によって、これまでよくわかっていなかった火星外圏の密度モデルに制限を付けることができたのである<sup>27)</sup>。

## 5. 今後の展望. 惑星探査の大航海時代に向けて

筆者らは広がったX線放射に最も感度が高い「すざく」衛星の特徴を活かして、木星、地球、火星からのX線を研究している。木星では放射線帯と一致した広がった硬X線を世界で初めて検出し、数十MeVの電子による逆コンプトン放射説を太陽系天体に対して初めて提唱した。地球では太陽風と外圏との相互作用による電荷交換X線を観測し、外圏密度をこれまでにない精度で求めた。そして外圏密度の変動や太陽風の輸送問題に取り組んでいる。火星では、太陽極小期に初めてX線観測を行い、高い精度で外圏X線の上限値を求めることで、従来の太陽極小期の外圏密度



モデルに制限を付けることができた。

多くの方が指摘しているとおり、21世紀は惑星探査の大航海時代である。日米欧では、水星から太陽系外まで、ここ10年で10を超える探査衛星が計画され、日本も水星、金星、地球、火星、木星を探査する予定である。こうしたなか、X線は惑星の地表の分析といった従来からの使い方に加えて、惑星の大気・放射線の情報を得る新しい観測手段として注目されており、一部の探査衛星にX線検出器の搭載が検討されている。X線で惑星に近づいて観測ができれば、感度はさらに向上し、未知の放射が見つかるであろう。また地球近傍の衛星であっても、これまでは大型衛星を使ってごく限られた時間しか見ていないため、専用の小型衛星を打ち上げて惑星X線を常時モニタリングすれば、時々刻々変化する太陽系の環境に新たな知見をもたらすことは間違いない。

科学の進展は常に技術の革新によってもたらされる。筆者らは惑星X線に新たなブレークスルーを起こすべく、10 kgクラスの超小型衛星にも搭載できる超軽量光学系を開発し、上で述べた惑星モニタリング衛星を考えつつある。さらにX線CCDに比べ1桁以上、エネルギー分解能の良いX線マイクロカロリメーターを次世代衛星に向けて開発している。日本の衛星による惑星X線の観測に期待していただきたい。

### 参考文献

- 1) Metzger A. E., et al., 1983, J. Geophys. Res. 88, 7731
- 2) Snowden S. L., et al., 1994, ApJ 424, 714
- 3) Gladstone G. R., et al., 2002, Nature 415, 1000
- 4) Wargelin B. J., et al., 2004, ApJ 607, 596
- 5) Dennerl K., et al., 2002, A&A 386, 319
- 6) Dennerl K., 2002, A&A 394, 1119
- 7) Ness J.-U., et al., 2004, A&A 418, 337
- 8) Branduardi-Raymont G., et al., 2004, A&A 424, 331
- 9) Snowden S. L., et al., 2004, ApJ 610, 1182

- 10) Dennerl K., et al., 2006, A&A 451, 709
- 11) Ness J.-U., et al., 2004, A&A 414, L49
- 12) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 13) Branduardi-Raymont G., et al., 2007, A&A 463, 761
- 14) Branduardi-Raymont G., et al., 2007, Planet. Space Sci. 55, 1126
- 15) Bagenal F., et al., 2004 Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
- 16) Bolton S. J., et al., 2001, Geophys. Res. Lett. 28, 907
- 17) Ezoe Y., et al., 2010, ApJ 709, L178
- 18) Vij K. K., et al., 1975, J. Geophys. Res. 80, 2869
- 19) Luhmann J. G., et al., 1979, Geophys. Res. Lett. 6, 25
- 20) McKenzie D. L., et al., 1982, J. Atmos. Terr. Phys. 44, 499
- 21) Fishman G. J., et al., 1994, Science 264, 1313
- 22) 土屋, 榎戸, 2008, 天文月報 11, 667
- 23) Cox D. P., 1998, The Local Bubble and Beyond, 121
- 24) Fujimoto R., 2007, PASJ 59, S133
- 25) Ezoe Y., et al., 2010, PASJ 62, 981
- 26) Krasnopolsky V. A., Gladstone, G. R., 1996, J. Geophys. Res. 101, 15765
- 27) Ishikawa K., 投稿準備中

### Planets Observed with the X-Ray Observatory Suzaku

Yuichiro EZOE

*Department of Physics, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan*

Abstract: In spite of their proximity, there remain many puzzles on atmospheric and magnetospheric environments of planets in the solar system. Thanks to advances in space X-ray observations, X-ray emission from planets is now becoming a new scientific field. These remote X-ray observations can be complementary to in situ exploration missions, in order to investigate the planetary environments. We have been studying Jovian magnetosphere, and Earth's and Martian exospheres, using the Suzaku satellite which is best to study diffuse X-ray emission.