

## 特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その1」

# 将来木星探査とX線観測

江副 祐一郎<sup>1</sup>, 木村 智樹<sup>2</sup>, 笠原 慧<sup>2</sup>, 山崎 敦<sup>2</sup>, 三好 由純<sup>3</sup>

2011年8月31日受領, 2011年10月20日受理.

(要旨) 2020年代に計画されている国際的な木星探査計画の中で, 日本は木星磁気圏のプラズマを高緯度から俯瞰的に可視光, 赤外線, 電波, X線, 高エネルギー中性粒子などで多波長観測することで, 粒子加速の全貌, 木星と衛星との磁場やプラズマを介した相互作用, 木星の高速回転で駆動される現象を探ることを狙う. 従来の木星探査に欠けていた波長として, 搭載を検討しているのがX線リモートセンシング装置である. 本稿では, 地球周回のX線天文衛星による木星系からのX線についての急速な理解と課題を紹介し, 将来木星探査に向けた装置の概念設計と特徴, 必要とされる装置技術と開発の予定について報告する.

## 1. はじめに

20世紀の宇宙物理は, 古くから存在した可視光による観測の発展に加え, 電波や赤外線そしてX線やγ線といった新たな観測手段が加わることで, 激動する宇宙の姿を明らかにしてきた. たとえば銀河団と呼ばれる数百個の銀河からなる巨大な天体では, 可視光では個々の銀河が見えるが, それは全体の質量のわずか数%に過ぎず, X線で見える数千万度の高温ガスはそのざっと数倍の質量を持つ. この高温ガスを重力的に閉じ込めているのが, 見えないダークマターであり, 銀河やプラズマの10倍程度の質量を持つ[1]. こうした成果は宇宙をさまざまな手段で眺めることの重要性を示している.

宇宙における通常物質の大半は, この銀河団ガスに代表されるようにプラズマ状態にあり, 銀河から吹き出す噴水のような数百万度の高温ガス, 太陽系内を満たす太陽風などとして, 宇宙のあらゆる場所で見られる. プラズマは背景電磁場や, 自らが誘起する電磁場によって, 自縄自縛の非線形な運動を行う. 宇宙に普遍的に存在するプラズマの物理を知るために大きな役割を果たしてきたのが, 太陽圏の探査衛星によるその

場観測である. たとえば太陽風における衝撃波にともなう粒子加速を説明するための移流拡散理論は, 超新星残骸やブラックホールジェットのプラズマにおける粒子加速へと発展したし, 太陽や地球磁気圏における磁気リコネクションは, 原始星のX線フレアや銀河団でのプラズマ加熱の説明に応用されつつある[2-4]. 新たなプラズマ物理を拓くべく, 2020年代に向けて, 日本は欧米と共に国際的な木星探査計画を進めている. 本計画は当初は欧日で進められLaplaceという名前であったが, その後, 米が加わることでEJSM (Europa Jupiter System Mission)と名を変え, 現在も欧米の競争的なミッション選定の中で勝ち残っている. 日本も2007年からJAXA宇宙研にワーキンググループが設立され, 衛星システム検討などが行われてきた. 本計画において, 欧米がガリレオ衛星の生命探査をメインとするのに対して<sup>\*1,2</sup>, 日本は木星磁気圏の探査をメインとする<sup>\*3</sup>. これは地球磁気圏を探査した「あけぼの」, GEOTAIL, 「れいめい」, 月探査機「かぐや」, 火星探査機「のぞみ」, さらに水星探査機Bepi Colombo MMO (2014年打ち上げ予定)の伝統を受け継ぐもので, 磁気圏プラズマという日本の得意分野をさらに発展させる流れと言えよう.

1. 首都大学東京 大学院 理工学研究科 物理学専攻  
2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙プラズマ研究系  
3. 名古屋大学 太陽地球環境研究所  
ezeo@tmu.ac.jp

\*1. <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=107>  
\*2. <http://opfm.jpl.nasa.gov/europajupitersystemmissionejsm/>  
\*3. <http://sprg.isas.jaxa.jp/jupiter/pukiwiki/index.php>

本誌の読者は良くご存じの通り、木星は太陽系惑星で大きさとしても磁場の強さとしても最大最強の磁気圏を持ち、その大きさは太陽側で木星半径の100倍ほど、磁場の強さは赤道面で4 Gほどにも達する[5]。過去の探査衛星や地上の電波観測から、磁気圏には少なくとも50 MeVにも達する高エネルギー電子が存在することが分かっている[5]。しかしながら、こうした高エネルギー粒子はどのように生まれ、そして消失するのかは、実は謎のままである。そこで木星磁気圏における粒子加速、木星と衛星との磁場やプラズマを介した相互作用、木星の高速回転によって駆動されるオーロラなどの現象を探るのが日本の磁気圏探査の役割である。

木星磁気圏における高エネルギー粒子の生成と消失について、現在、考えられているシナリオは以下である。まず太陽風や、磁気圏テールから磁気リコネクションで供給されたプラズマ粒子が、木星磁場にトラップされ、磁力線を横切って内側に移動する。移動する中で粒子は磁場中の粒子の第一断熱不変量から来るベータトロン加速によって加速される。具体的には磁場の強さを  $B$ 、電子の磁場に垂直方向の運動量  $p_{\text{perp}}$ 、質量  $m$ 、力学的エネルギー  $E_k$ 、静止エネルギーを  $E_0$  とおくと、

$$\mu = \frac{p_{\text{perp}}^2}{2mB} = \frac{E_k}{B} \left( 1 + \frac{E_k}{2E_0} \right) \quad (1)$$

が保存する[5]。ここで電子のピッチ角としては、簡単のため  $90^\circ$  を仮定した。観測的には内部磁気圏 ( $L=1.5$ ) の  $B = 1\text{G} = 10^5\text{nT}$  の地点で50 MeVの電子が観測されているから、 $\mu \approx 0.03\text{ MeV/nT}$  となる。数値計算からは、イオ近傍 ( $6 R_J$ ) での高エネルギー電子の位相空間密度を境界条件として、そこから内側に向かって動径方向に拡散するとのモデルで、内部放射線帯 ( $\leq 6 R_J$ ) の高エネルギー電子分布をよく説明することができる。しかし、上記の動径方向拡散のみでは、太陽風プラズマを木星の内部放射線帯に存在する数十 MeV の電子の位相空間密度を説明することができないため、イオ近傍に至るまでに非断熱加速が必要であると推測され、波動粒子相互作用や再循環などの過程が重要な役割を果たしていると考えられている[6,7]。

プラズマ粒子が外部磁気圏 ( $>40 R_J$ ) から内部へと移動するにしたがって、上記のような加速を受ける中で、

粒子の一部は衛星やダスト、リングなどと衝突して吸収される。また一部は木星近傍において、シンクロトロン電波を発してエネルギーを失う[8]。そして一部は木星電離圏へ降り込んで、オーロラの発光を起こす[9]。なお極域電離圏上空では、磁気圏界面における周期的なりコネクションによって沿磁力線電流が励起され、磁力線沿いにメガボルトオーダーの電位差が生まれる。そこで降り込み電子やイオンは上記の加速機構とは別に、さらに MeV オーダーの加速を受けると考えられている[10]。

このように木星磁気圏における粒子の加速と消失については、高エネルギー粒子やオーロラ発光のその場・遠隔観測に基づいた理論シナリオが構築されつつあるものの、磁気圏-電離圏結合、イオ近傍までの非断熱加速、沿磁力線電流による加速など観測的に十分解明できていない現象も数多く残っている。こうした木星磁気圏における高エネルギー粒子の生成・消滅の全貌を知るには、高エネルギー粒子の場所毎のスペクトル、粒子の最高エネルギー、オーロラ発光などを空間的および時間発展的に見る必要がある。そこで日本の木星探査衛星では、高緯度からオーロラや磁気圏を多波長(可視光、赤外線、電波、X線、高エネルギー中性粒子)イメージで俯瞰し、粒子加速ダイナミクスを抑えることを計画している。これは正に「宇宙プラズマをさまざまな手段でその場観測し、新たな物理を切り拓く」という、宇宙物理における正当派アプローチと言える。本稿では日本の木星探査計画の「新しい目」として注目されている、木星系からのX線について紹介する。まずはじめに2000年代に入り、地球周回の衛星によって急速に得られた知見と課題をまとめ、次に将来木星探査に向けたX線「その場」観測の検討について述べる。

## 2. 木星系からのX線

木星からのX線を発見したのは30年前、初めてX線望遠鏡を搭載した米Einstein衛星であった[11]。しかし、当時の装置の角分解能や感度では、木星のどこ場所からどのような性質のX線が出ているのかは不明であった。理解が急速に進んだのは、2000年代に入ってから、米欧日の新世代のX線天文衛星Chandra, XMM-Newton, 「すざく」によってである。図1にこ

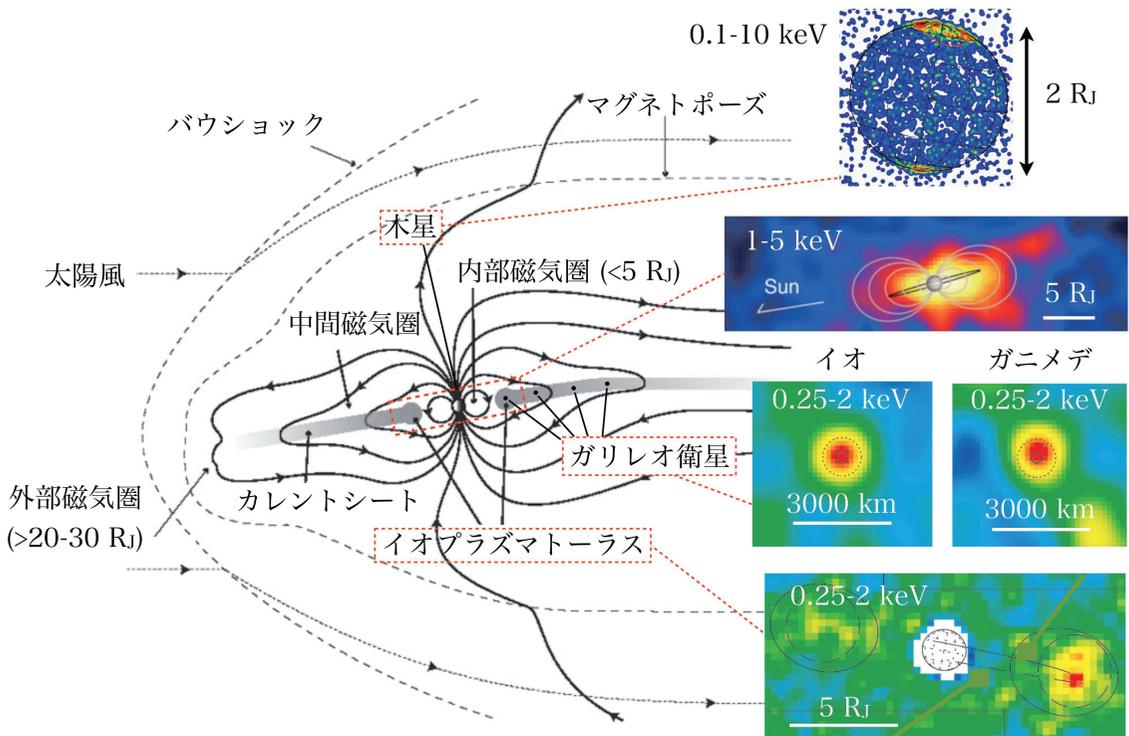


図1：木星磁気圏の模式図と発見されたX線天体。右上からそれぞれ、木星[12]、放射線帯[13]、イオプラズマトーラス[14]、ガリレオ衛星[14]。木星磁気圏の模式図は<http://www.bu.edu/csp/PASS/science/aurora.html>を参照した。X線画像についてはアメリカ天文学会からの許可を得て転載。

れまで発見されたX線天体をまとめる。以下ではそれぞれについて順を追って見てゆく。

## 2.1 木星

木星は、太陽を除いて太陽系内で最も明るいX線天体である。0.5秒角という優れた角分解能を誇る米Chandra衛星は木星からのX線がオーロラと中低緯度からの2成分から成ることを発見した[12]。図1の右上にChandraで得た木星のX線像を示す。オーロラ放射は木星の磁極と一致しており、高エネルギー粒子の極への降り込みに関係すると予想される。X線光度は $10^{16}$  erg  $s^{-1}$ 程度である。ChandraはこのX線オーロラの時間変動を解析し、 $\sim 45$ 分の準周期的変動も発見したがその原因は不明である。

X線オーロラの放射メカニズムは欧XMM-Newton衛星が明らかにした[15]。XMM NewtonはChandraに比べ、角分解能は1桁落ちるが、大面積の望遠鏡を

持ち、S/Nの良いX線スペクトルを取得できる。スペクトルは主に1 keV以下の高電離した輝線と1 keV以上に延びる連続成分から成ることが分かった。前者は核子当たり数MeVの高エネルギーイオンと高緯度大気との電荷交換反応、後者はkeV電子による制動放射と考えられる。すなわち、Chandraの画像から予測された通り、高エネルギー粒子の降り込みで説明がつく。

中低緯度の放射はほぼ一様であり、X線スペクトルから太陽X線の散乱が主な成因と考えられる[15]。典型的なX線光度は、 $3 \times 10^{15}$  erg  $s^{-1}$ であり、オーロラに比べて光度、表面輝度ともに低い。一方で木星表面の磁場分布とX線強度に相関があることも示唆されており[16]、降り込み粒子による寄与も考えられる。

このような大きな進展の一方で、以下のような謎や課題が残っている。(1)X線オーロラの準周期的変動は何が原因か?他波長たとえば電波で見られる40分

周期のバースト現象[17]などと関係あるのか？(2)X線オーロラに降り込んでいる高エネルギーイオンや電子の起源は何か？太陽風や磁気圏(イオなど)、もしくはその両方か？(3)中低緯度の放射は本当に全て太陽X線散乱で説明つくだらうか？(4)中低緯度の放射から木星大気の化学組成を調べられないだらうか？

## 2.2 放射線帯

2005年に打ち上げられた日本のX線天文衛星「すざく」は、欧米の衛星に比べると角度分解能は劣るものの、比較的大きな面積の望遠鏡と、近地球軌道ゆえの低く安定したバックグラウンドを持ち、広がった天体には世界で最も優れた感度を持つ。われわれは木星の観測データを解析し、図1右に示す通り、木星の放射線帯(およびイオプラズマトーラス)に一致する広がった硬X線を検出した[13]。X線光度は $3 \times 10^{15} \text{ erg s}^{-1}$ と木星中低緯度からのX線に匹敵する。1-5 keVのX線のスペクトルは単調なパワーローモデルで再現され、非熱的放射を示唆する。放射メカニズムの候補として、われわれは数十MeVの相対論的電子による太陽光の逆コンプトン散乱を提唱した。このメカニズムはスペクトルの形状をうまく説明できるが、必要とされる電子密度は、経験的な放射線電子モデルより約1桁高いため、今後の検証が必要である。もし仮に本当だとすれば、広がった硬X線は木星の相対論的電子の空間・スペクトル分布をモニターする新たな手段となりうる。

残された課題は以下の通りである。(1)広がった硬X線の真の放射メカニズムは何か？X線は相対論的な電子をモニターする新たな手段となりうるか？(2)硬X線放射は放射線帯だけでなくイオプラズマトーラスの領域に空間的に一致しているが、「すざく」の角度

分解能では位置分解できなかった。イオプラズマトーラスからの寄与はあるのか？もしそうだとすると放射機構は何か？

## 2.3 ガリレオ衛星

米Chandra衛星はその優れた角分解能を生かし、ガリレオ衛星イオおよびガニメデからのかすかなX線も検出した[14](図1)。X線光度はどちらも $2 \times 10^{13} \text{ erg s}^{-1}$ 程度と木星本体にくらべ約3桁低い。検出された光子のX線エネルギーは0.5-0.7 keVに集中しており、おそらく磁気圏の高エネルギー酸素イオンが衛星の表面に衝突して出た酸素輝線が主成分ではないかと考えられる。しかしながら、X線スペクトルや時間変動といった基本的な情報が欠けているため、多くの課題が残っている。(1)ガリレオ衛星のスペクトルはどういう形状か？(2)どのような種のまたどのようなエネルギーのイオンが衛星表面に衝突しているのか？(3)X線イメージとスペクトルから衛星の表面組成が分からないか？

## 2.4 イオプラズマトーラス

米Chandra衛星はさらにイオプラズマトーラスの中心部分からも軟X線(0.25-2 keV)を検出した[14](図1右下)。X線光度は $1 \times 10^{14} \text{ erg s}^{-1}$ とガリレオ衛星よりは大きい、木星中低緯度や放射線帯からの放射よりは1桁以上小さい。X線スペクトルは0.57 keVの酸素輝線と連続成分から成り、高電離した酸素イオンと数百から数千eV電子による放射を示唆する。しかし、探査機によって調べられたイオプラズマトーラスの主成分は数十eVの電子であると考えられ、こうした高電離イオンや高エネルギー電子の起源は謎のまま

表1：木星系からのX線と放射機構についての理解。

天体	エネルギー範囲 (keV)	X線光度 (erg s <sup>-1</sup> )	放射機構
木星オーロラ	0.1-10 keV	~ 10 <sup>16</sup>	MeV イオン電荷交換+keV 電子制動放射
木星中低緯度	0.1-10 keV	~ 3 × 10 <sup>15</sup>	太陽X線散乱+ 磁気圏粒子降り込み？
放射線帯	1-5 keV	~ 3 × 10 <sup>15</sup>	数十MeV 電子逆コンプトン？
ガリレオ衛星 <sup>a</sup>	0.5-0.7 keV?	~ 2 × 10 <sup>13</sup>	衛星表面へのイオン衝突？
IPT <sup>b</sup>	0.25-2 keV	~ 10 <sup>14</sup>	高電離イオン輝線+keV 電子制動放射？

<sup>a</sup>イオおよびガニメデ。光度は個々の値。 <sup>b</sup>イオプラズマトーラスの略。

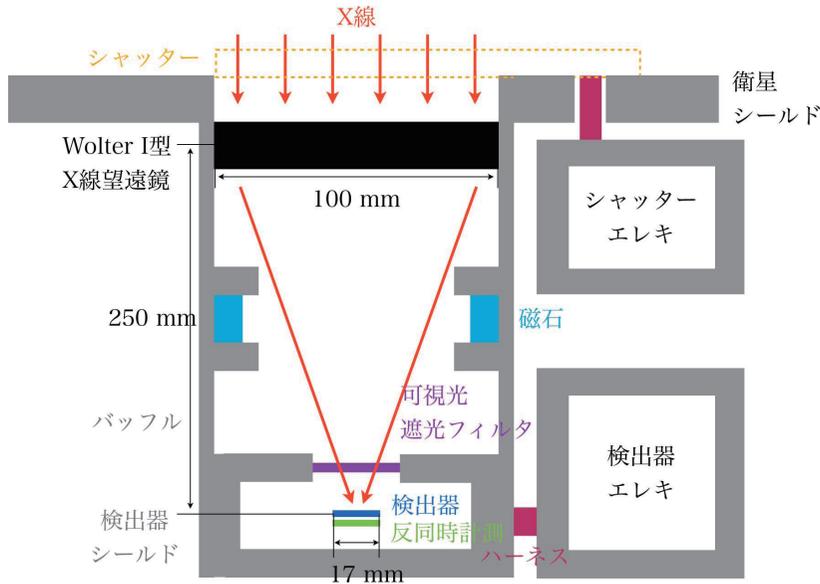


図2：X線リモートセンシング装置JUXTAのコンセプト。

表2：JUXTAへのサイエンス要求。

項目	値	要求理由
エネルギーバンド	0.3->2 keV	イオン輝線(< 1 keV)+ 電子制動放射(> 1 keV)
角度分解能	< 5 分角	オーロラホットスポット (~ 10 <sup>4</sup> km, 20分角@ 30 R <sub>J</sub> )
エネルギー分解能	< 100 eV	酸素, 硫黄, 炭素の輝線を分解
時間分解能	< 1 min	オーロラの準周期的発光を分解
有効面積	> 3 cm <sup>2</sup> @ 0.6 keV	時間分解能と木星オーロラフラックス
視野	> 4 deg φ	木星の視直径@ 30 R <sub>J</sub>

である。よって以下のような課題が残っている。(1) 高電離イオンや電子はイオプラズマトーラス付近でどのように加熱/加速されたのか?(2) イオプラズマトーラスをX線観測することで、この領域での粒子加速のダイナミクスをモニターできないか?たとえば紫外線観測で見られるような突発的な電子温度の増加[18]はないか?(3) 「すざく」で観測された、より高エネルギー(1-5 keV)のX線放射とイオプラズマトーラスからの軟X線(0.25-2 keV)との関係は?

### 2.5 これからのX線観測に向けて

このように木星系からのX線は、2000年代からの

めざましい「天文的な発見」フェイズを経て、「放射機構の理解」へと進みつつある。そして最終的には「木星磁気圏プラズマ物理への応用」へと進むことが期待される。表1に木星系からのX線と現在の理解をまとめた。ご覧頂いて分かる通り、明るい木星からのX線オーロラ以外は放射機構は完全に理解されていない。一方で、X線が出ているという事実それ自体が、X線観測が、keVからMeVにも達するような高エネルギー粒子を観測する新たな手段として確立しうることを示唆している。圧倒的な光子統計で、しかも解像度良く、さらに他波長の観測と同時に木星系からのX線をモニターできれば、X線は木星磁気圏での粒子加速と

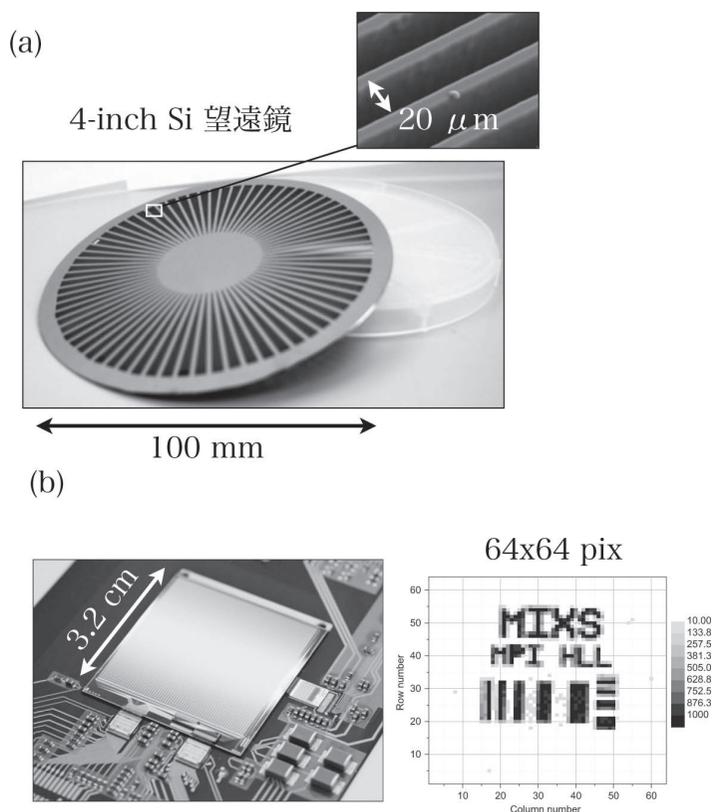


図3：JUXTAの(a)X線望遠鏡[21]と(b)検出器[22]の候補技術。

表3：木星系天体から期待されるX線光子フラックスとおおまかな見かけのサイズ<sup>a</sup>。

天体光子	フラックス ( $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	形状(サイズ) (分角)
木星オーロラ <sup>b</sup>	～ 12	極冠(100×20)
木星中低緯度 <sup>b</sup>	～ 6	円(230 φ)
放射線帯 <sup>c</sup>	～ 3	楕円(1700×900 φ)
ガリレオ衛星 <sup>d</sup>	～ 0.03	円(5.8, 5.0 φ)
IPT <sup>d</sup>	～ 0.3	楕円(340×460 φ)×2

<sup>a</sup> 天体と観測者の距離は30  $R_J$ ，エネルギーバンドは0.3-2 keV を仮定。

<sup>b</sup> [15]。 <sup>c</sup> [13]。 <sup>d</sup> [14]。

いった根本的な問題を解決する鍵となりうる。そこで我々は2020年代に計画されている日本の木星探査に向けて、世界初となる探査衛星搭載の木星X線リモートセンシング装置の検討と開発を行っている。

### 3. X線リモートセンシング装置 JUXTA

われわれは2020年代に計画されている日本の木星磁気圏探査衛星に向けてJUXTA(JUperiter X-ray Telescope Array)を検討・開発している。JUXTAにはラテン語で「近接」という意味があり、その場観測

するという本装置の目的と合致する。本探査計画の衛星システム検討はJAXA宇宙研を中心に進められている。われわれは其中で想定されている近木点 $30 R_J$ において、木星オーロラからのX線を十分な感度で検出することを第一目標にすえて、表2のようなサイエンス要求をまとめた。

JUXTAに求められるのは軟X線における広視野の撮像分光観測であり、従来のX線天文衛星と同様に、イメージ、スペクトル、ライトカーブを同時に取得する必要がある。装置の概念図を図2に示す。直径4インチ(100 mm)のWolter I型望遠鏡と検出器から成り、焦点距離は250 mmと短い。望遠鏡と検出器以外にも放射線や隕石、木星からの可視光コンタミ除去のために、シャッター、磁石、可視光遮光フィルタ、反同時計測検出器などが必要になると考えている。

JUXTAの望遠鏡は非常にコンパクトであるが、対木星性能を考えると、天体からの距離が小さいことで、地球周回の衛星に比べて、集光力は $8 \times 10^4$ 倍、解像度は300倍に上がる。よってたとえば面積が $1 \text{ cm}^2$ 、角度分解能が5分角であれば、地球周回の衛星の $8 \text{ m}^2$ および1秒角に相当する。従来のX線天文衛星に搭載された望遠鏡の面積は最大で $0.3 \text{ m}^2$ (XMM-Newton)、角分解能は0.5秒角(Chandra)であったことを考えれば、JUXTAはコンパクトながら木星系からのX線に対しては圧倒的な性能を誇りうる事が分かる。

天体と衛星の距離が $30 R_J$ とした場合にJUXTAで期待される光子フラックスと見かけの大きさを表3に示す。木星オーロラのフラックスは $\sim 12 \text{ ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、視直径は230分角すなわち約 $4 \text{ deg}$ となる。よって $3 \text{ cm}^2$ の面積があれば、木星オーロラから1分間に約2000カウントの光子数が得られ、光子統計で考えると約 $50 \sigma$ となる。実際には検出器ノイズでS/Nは下がるため、放射線ノイズの見積もりが必要となる。そこでまずミッションライフを1年程度と仮定した際の、最悪ケース(磁気赤道面,  $30 R_J$ )でのトータルドーズおよび検出器ノイズの見積もりを行っている。現在の所、衛星構体の厚みをAl 8 mmと仮定すると、トータルドーズは後述するDepFET検出器にとって問題ないレベルに抑えることが出来そうである。一方ノイズ低減の観点からは磁気赤道面からできるだけ高い高度で観測することが望ましいことが分かって来た。すなわち運用を工夫することで、観測は実現可能と考

えられる。

サイエンス要求以外にJUXTAを設計する上で考えなくてはいけないのが、木星探査の厳しい放射線環境と限られたシステムリソースである。具体的に求められる重量は15 kg以下、電力は15 W以下に抑える必要がある(暫定値)。そこでわれわれは新しいX線望遠鏡と検出器技術の搭載を考えている。

望遠鏡の候補はマイクロマシン技術を応用した、日本独自のX線光学系である[19]。半導体微細加工のエッチング技術により、数百 $\mu\text{m}$ の薄い基板に $20 \mu\text{m}$ 程度の細かい曲面穴をあけ、その側壁を反射鏡として利用する。側壁はアニールや磁気流体による研磨で平滑化し、球面変形した上、2枚の基板を重ねることで望遠鏡が完成する。本方式では基板が薄いため、従来に比べ、1桁以上軽い、世界最軽量のX線望遠鏡となりうる。そのため、従来の技術では難しかった探査衛星への搭載も可能となった。さらにエッチング技術で一度に大量の鏡を一体成形で製作できるため、一枚一枚鏡を製作し、正確に並べる必要があった従来の技術に比べて圧倒的に迅速かつ低労力となる。

われわれは自らクリーンルームで光学系の試作を行って、図3(a)に示すような望遠鏡1段分を完成させて、この方法でのX線結像の実証を世界で初めて成功した。現在はJUXTA望遠鏡プロトタイプ製作に入っており、JAXAの小型技術実証衛星に提案中である。基板の保持機構についても開発を行っており、近々に振動・音響・温度サイクル試験を行う予定である。そして2010年代なかばごろに宇宙実証を行いたいと考えている。

検出器の候補はDepFET(Depleted P-channel FET)というドイツのマックスプランク研究所で開発された新しい半導体ピクセル検出器である[20]。われわれはマックスプランク研究所と共同で検出器の技術検討を開始している。図3(b)に検出器の写真を示す。DepFETは従来の半導体検出器と同じく、X線によって作られた電子ホール対に逆バイアスをかけて、電極に集めてエネルギーを測定する。従来と違うのは、ピクセル毎にFETアンプを持つことであり、これまでのX線天文衛星で用いられてきたX線CCDに比べ、1桁以上高速の読み出しが可能となる。これは天体のライトカーブ観測にはもちろんのこと、検出器の放射線ノイズ除去にとっても重要である。またピクセルに電

圧をかけなくても、不純物ドーブによる internalgate に電荷が溜まることで、読み出し電力を抑える。エネルギー分解能も半導体検出器の理論限界に近い値を実現可能である。さらに最も重要な点として、FET 構造の裏面から X 線を照射できること、ピクセル毎に読み出すことで、X 線 CCD に比べて放射線耐性も高い。JUXTA の視野と角度分解能から要求されるピクセル数は、面積約 17 mm 角に対して約 50 × 50 以上である。図 3 に示すように、これらの要求を満たすデバイスは開発できつつある。以上のような優れた特性のため、DepFET は水星探査計画 BepColombo などに搭載が予定されている<sup>\*4</sup>。BepColombo の打ち上げは 2014 年、水星到着は 2020 年を予定しており、JUXTA の開発へのフィードバックが可能である。

このように我々は JUXTA の概念設計を固め、要求性能や環境条件を満たす装置のもの作りを開始した。望遠鏡の課題は要求される角度分解能と有効面積、安定した保持機構の実現であり、プロトタイプ製作を通じて技術の目処をつけつつある。検出器の課題は軌道上でのオンボードデータプロセッシングや、できるだけ省電力のシステムの実現であり、ドイツの研究者と検討を進めている。またシャッター等のサブシステムも過去の衛星搭載品の知見を生かして開発する予定である。装置開発と平行して、サイエンスの検討も必要であり、木星オーロラや放射線帯からの X 線の観測シミュレーションを開始した。

## 4. おわりに

X 線による撮像分光は、木星磁気圏における粒子加速、木星と衛星の磁場やプラズマを介した相互作用、木星の高速回転で駆動されるオーロラなどの現象を探る、新たな観測手段となりうる。我々は木星探査計画に向けて、世界ではじめての X 線その場リモートセンシング装置 JUXTA の検討と開発を開始した。JUXTA が実現すれば、現在計画されている将来の大型 X 線天文衛星でも実現が難しいほどの高い光子統計と解像度の木星 X 線のデータが得られるであろう。既存の X 線に加えて、木星の外圏や衛星カリスト、エウロパといった新たな天体から X 線が発見

されることも予想される。木星探査に要求される厳しい放射線環境やシステムリソースの制限を満たすため、JUXTA には新しい望遠鏡と検出器技術を用いる予定である。そのため、木星探査衛星の打ち上げ前にこれらの技術を宇宙で実証を行って、万全の体制で打ち上げに望むことができるように開発を進めている。

## 5. 謝辞

JUXTA は宇宙プラズマ、惑星、マイクロマシン、X 線天文の分野を超えた共同研究に基づくものです。JAXA 宇宙研 藤本正樹先生、東北大 笠羽康正先生には検討のきっかけを作って頂きました。また X 線天文衛星と他波長との共同観測の実現に向けてご協力頂いております。首都大 大橋隆哉先生、JAXA 宇宙研 満田和久先生には X 線データ解析から装置開発まで広くサポートして頂いています。そして首都大や JAXA 宇宙研の大学院生とは、データ解析や装置開発を共に行っています。こうしたさまざまなご協力を頂いている皆様に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 谷口義明ほか, 2007, シリーズ現代の天文学 4 銀河 (1) (日本評論社).
- [2] 寺沢敏夫, 2002, 岩波講座 物理の世界 地球と宇宙の物理 <2> 太陽圏の物理 (岩波書店).
- [3] 柴田一成ほか, 1999, 活動する宇宙 - 天体活動現象の物理 - (裳華房).
- [4] 牧島一夫, 1999, プラズマ・核融合学会誌 75, 509.
- [5] Bagenal, F. et al., 2004, Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere (Cambridge University Press).
- [6] Horne, R. B. et al., 2008, Nature Physics 4, 301.
- [7] Nishida, A., 1976, JGR 81, 1771.
- [8] Miyoshi, Y. et al., 1999, GRL 26, 9.
- [9] Clarke, J. T. et al., 1996, Science 274, 404.
- [10] Cravens, T. E. et al., 2003, JGR 108, 1465.
- [11] Metzger, A. E. et al., 1983, JGR 88, 7731.
- [12] Gladstone, G. R. et al., 2002, Nature 415, 1000.
- [13] Ezoe, Y. et al., 2010, ApJL 709, 178.
- [14] Elsner, R. F. et al., 2010, ApJ 572, 1077.
- [15] Branduari-Raymont, G. et al., 2004, A&A 424, 331.

\*4. <http://www.mps.mpg.de/en/projekte/bepicolombo/mixs/>

- [16] Bhardwaj, A. et al., 2005, JGR 111, 11225.
- [17] MacDowall, R. J. et al., 1993, Planet. Space Sci. 41, 1059.
- [18] Steffl, A. J. et al., 2004, Icarus 172, 78.
- [19] Ezoe, Y. et al., 2010, Microsys. Tech. 16, 1633.
- [20] Stüder, L. et al., 2010, SPIE 7732, 77321I.
- [21] Mitsuishi, I. et al., Sens. Act. A., 投稿済み.
- [22] Treis, J. et al., 2010, NIM-A 624, 540.