

X線結像光学ニューズレター

No.11 2000年2月発行

X線専用のCCD素子の開発

大阪大学大学院理学研究科 常深 博

最近、ビデオとかデジカメとか、可視光画像はすっかりフィルムからCCDに置き換わってしまった。そのメリットはちょっとデジカメの画像をいじってみれば実感できる。とにかく、従来のものよりもはるかに都合がいい。同じことが、X線画像についても起きている。X線天文学ではX線光子一つ一つを直接CCDで検出する方法が主流になっている。CCDは、可視光にせよ、X線にせよ、光子がCCD内で光電吸収した後に作られる電子を電気信号とする。可視光なら光子一個は電子をせいぜい一個しか作らないが、X線では光子一個がそのエネルギーに比例した多数の電子を作る。X線検出器の較正に良く使われる6 keVのX線光子一個は1600個ほどの電子を作る。CCD素子を冷却して読み出せば、電子数にして2~3個の精度で信号強度を決定できる。つまり、CCDによってX線光子一つ一つのエネルギー、つまりX線の色、を精度良く測定できる。ちなみに、CCDで可視光の色を決められるのは、CCDの画素一つ一つが色フィルターを持っているからである。

X線を精度よく検出するには、いろいろな点で可視光で使うCCDとは異なる素子が必要である。低エネルギー(1 keV以下)のX線は物質に吸収され易いので、X線用CCD素子上面には、保護ガラスも色フィルターもない。可視光を良く透過する酸化珪素膜もできるだけ薄くする。一方、高エネルギー(数keV以上)のX線は物質を透過し易いので、X線を検出する空乏層領域はできるだけ厚くしたい。可視光なら数 μm もあれば良いが、10 keVのX線の珪素内の平均吸収距離は100 μm ほどもある。厚い空乏層を必要とするのは、X線領域と近赤外線領域で使われるCCD素子である。可視光領域のデジカメは小型化の要求が強く、焦点像を小さくして素子を小型化する、つまり微小画素化が必要とされる。X線では光学系の制限で焦点像を小さくできず、できるだけ有効面積の大きな素子が必要で、画素の大きなものが使われている。

X線光子計数をするCCDを宇宙で初めて使ったのは、1993年に打ち上げた『あすか』である。アメリカのMIT/リンカーン研究所製のCCD素子(27 μm 角の画素が420×422個、空乏層は35 μm 厚)を4個並べたカメラを2台搭載した。これに続く衛星は、昨年7月に打ち上がったアメリカの『チャンドラ』(24 μm 角の画素が1024×1024個、空乏層は70 μm 厚の素子)、12月に打ち上がったヨーロッパのXMM衛星(150 μm 角の画素が400×400個、空乏層のは280 μm 厚などの素子)であり、今年2月に打ち上がる予定の我が国のASTRO-E衛星(搭載素子は『チャンドラ』と同じ)である。

X線直接撮像型CCDは、現在では宇宙X線観測衛星の標準的な観測装置になっている。『あすか』ではX線望遠鏡の解像度がCCD素子の画素の大きさとマッチしていなかったが、その後、『チャンドラ』では望遠鏡の結像性能がCCDのそれを上回ったとも言える。今後のX線CCDはさらに解像度の進んだ素子が必要となろう。X線は可視光に比べ波長が短く、理想的にはX線望遠鏡は可視光の望遠鏡よりもはるかに高い空間分解能を発揮する。CCDの画素がある程度小さければ、X線の偏光観測も可能になり、入射位置も画素サイズよりもはるかに高い精度で決定できることが知られている。もちろん、宇宙観測用に開発されたX線用CCDが地上実験や工業用として広く使われるようになるだろう。

今月8日にX線天文衛星ASTRO-Eが宇宙科学研究所鹿児島宇宙観測所からM-Vロケットで打ち上げられます。これは、はくちょう/CORSA-b(1979年2月21日打ち上げ)、てんま/ASTRO-B(1983年2月20日打ち上げ)、ぎんが/ASTRO-C(1987年2月5日打ち上げ)、あすか/ASTRO-D(1993年2月20日打ち上げ)に続く、日本で5番目のX線天文衛星です。この衛星では、宇宙論的な遠距離にある天体をX線で詳しく観測し、宇宙の高温プラズマのX線分光観測を高い精度と広いエネルギー範囲で行なうこと等を観測目的としており、宇宙の進化に関する新しい知見が得られることが期待されます。

このX線望遠鏡は名古屋大学大学院理学研究科U研とNASA/GSFCとが共同で製作したレプリカミラーを使用しています。この反射鏡基板は厚さ0.15mmのアルミニウム薄板で、市販の大口径のガラス管に金を蒸着し、予め円弧状に成型したアルミニウム薄板を接着剤で貼り付け、養生後に金とガラスの間でアルミニウム基板を剥離して、疑似円錐のX線反射鏡としたものです。この方法では、反射面およびマンドレルの面に光学研磨を施していません。円周を4分割して製作し、望遠鏡の製作時に4枚の反射鏡を組み立てて全周の反射鏡とし、前後2組の反射鏡で2回反射させて集光しています。反射鏡の口径400mm、長さ200mm、焦点距離4.75mで、同心円上に配置した170組の反射鏡より成り、空間分解能は60 arcsecです。ASTRO-Eには次世代の硬X線用検出器も搭載されています。

昨年7月22日にスペースシャトルColumbiaで米国のX線天文衛星Chandra X-Ray ObservatoryがCape Canaveralから打ち上げられました。これはAXAFプロジェクトと呼ばれていたものです。このX線望遠鏡は、口径1200mm、長さ830mm、焦点距離10m、空間分解能0.6 arcsecの高精度な非球面望遠鏡です。基板は厚さ25.4mmの零熱膨張ガラスセラミックスZERODURであり、放物面と双曲面からなる口径の異なる4枚の反射鏡で構成されています。材料並びに基板の厚さの選択から考えて、最も形状精度の出し易い構造です。これは、Schott社(Maintz, ドイツ)で素材のZERODURを鋳造し、円管状に成形し、Hughes Danbury Optical Systems社(Danbury, CT)で、研削と光学研磨で円管の内面を放物面と双曲面に仕上げています。そこで使用した研磨装置はNASA/MSFC(Huntsville, AL)に現在は置いてあります。表面の洗浄とIrのコーティングをOCLI社(Santa Rosa, CA)で行い、Eastman Kodak社(Rochester, NY)で望遠鏡に組み立て、NASA/MSFCで校正し、TRW社(Redona Beach, CA)で最終組み立てをしています。

昨年12月10日にAriane 504ロケットで3台の新型X線望遠鏡からなるX-ray Multi-Mirror (XMM) 衛星を欧州宇宙機関(ESA)が打ち上げました。この望遠鏡は、集光面積を稼ぐため、レプリカミラー技術を使用しています。反射鏡の口径は700mm、長さは600mm、焦点距離は7.5mで、同心円上に配置した58枚の非球面反射鏡から成り、空間分解能は20 arcsecであります。これを製作する場合の金型となるガラスの外周は、Carl Zeiss社(Oberkochen, ドイツ)で研削後、放物面と双曲面とから成る高精度な非球面に光学研磨されました。その表面粗さは0.5nm rms以下であります。このガラスマンドレルに金を蒸着し、これにイタリーのMedia Lario/Kayser Threde社でニッケルを電鍍しています。電鍍されたニッケル基板の厚さは、内殻の反射鏡で0.5mm、外殻の反射鏡で1mmであり、ニッケル層の内部応力が最小になる条件で電鍍しています。ニッケルとガラスの熱膨張係数の差を利用してガラスと金との界面で剥離し、ニッケル基板のレプリカミラーを作成していま

す。ガラスマンドレルは洗浄後、次の反射鏡の製作に使用します。反射面は金であり、X線が入射する反射鏡間の隙間は内殻で1.8mm、外殻で4mmです。

超精密非球面X線反射鏡の製作技術を開発するため文部省科学研究費補助金重点領域研究「X線結像光学」の平成2年度の予算で超精密非球面加工装置を製作し、中部大学のクリーンルームに設置しました。本装置の位置決め最小設定単位は10nm、角度単位は1.3秒であり、Al-Mg合金製非球面マンドレルの加工に使用して来ましたが、HP社製の超精密位置決め用安定化レーザ及びAB社製の数値制御装置が故障し、部品の入手が不可能となりました。そこで、レーザをHP社のものからZYGO社のものに換え、数値制御装置をAB社からファナック社製に換えることにより、位置決め最小設定単位を1nm、角度単位を0.36秒にすることとしました。今年度末より装置の立ち上げを早急に行い、皆様のご指導・ご支援の元で、次期の高性能X線望遠鏡製作の基盤技術を確立したいと思っております。ご協力の程、よろしくお願い致します。

第5回 X線結像光学シンポジウムを終えて

名古屋大学大学院理学研究科 山下広順

21世紀に向けてX線結像光学の研究の一層の発展を図るために、文部省科学研究費重点領域研究「X線結像光学」によって平成5年までに4回開催されたX線結像光学シンポジウムを、6年間の中断の後、第5回として平成11年12月15日～16日に名古屋国際会議場でX線結像光学研究会主催のもとで開催した。この間に、重点領域研究の成果をもとに専門書「X線結像光学」の執筆が進められ、昨年7月に培風館から出版された。本シンポジウムは、「X線結像光学が拓く科学と技術—現状と将来展望—」を主題として、エネルギー（波長）領域40eV-100keV（30-0.01nm）における光学・計測技術とそれによる科学研究及びX線結像光学を支える基盤技術に主眼を置いた。宇宙科学、生体科学と医療技術、物質・材料科学、プラズマ・核融合科学、基盤技術のセッションに分け、31件の講演と41件のポスター発表が行われた。また、アメリカのスミソニアン天文台のVan Speybroeck博士を招待し、昨年7月に打ち上げられたX線天文衛星Chandraについて特別講演をお願いした。期間中には7社から企業展示があり、初日の夕方に懇親会を開催し、参加者の交流を図った。これまでの慣例にならって、皆様の協力により予稿集を作成した。参加者は164名となり、予想を上回る盛況であった。

宇宙科学では、X線天文衛星「あすか」による超新星の残骸と火星探査機「のぞみ」による地球磁気圏の撮像観測の成果が、X線望遠鏡、撮像型X線検出器と分光法の進捗状況が発表された。生体科学と医療技術では、X線顕微鏡の多様な展開、PF-ARやSPRING-8が稼働したことによって硬X線領域での生体観察の大きな進展が話題となった。物質・材料科学では、放射光の偏光特性、マイクロビームあるいはレーザーを併用した物質の表面・界面の構造解析の研究に大きな進展があった。プラズマ・核融合科学では、稼働を始めたLHDプラズマのX線計測、レーザープラズマの高性能X線結像計測、更に、X線レーザーの開発の状況が紹介された。基盤技術では、リソグラフィ技術、X線ホログラフィ等の進展状況が、分光素子や検出器の開発、非球面加工・薄膜形成・微細加工・多層膜等について多くの話題が提供された。その中で、X線レンズの開発が注目された。多くの迫力ある最新の研究成果が発表され、熱心な議論があったが、質疑の時間が少し短かったようだ。

これまでのシンポジウムでは軟X線領域での研究が中心であったが、光源の開発や基盤

技術の進歩によって、硬X線領域の研究が大きく進展してきたことが注目される。特に、位相コントラストの利用は結像光学に新たな展開をもたらすと思われる。科学目的は異なっても、それを達成するためのX線光学・計測技術は共通したものがあり、互いに有機的な連繋をして研究を進めることが重要であることを再認識した。この学際的なシンポジウムを隔年で開催してはどうかと考えている。これを機に、共同研究や新たなプロジェクト研究が推進されることを期待している。

本シンポジウムの開催にあたり、文部省科学研究費補助金特別推進研究（研究代表者山下広順）、基盤研究(A)（研究代表者青木貞雄、山本正樹、渡辺 誠）、科学技術振興事業団戦略的基礎研究（研究代表者常深 博）に開催経費の援助をしていただきました。また、杉本三奈（名古屋大学大学院理学研究科宇宙物理学研究室）さんには開催の準備等で大変お世話になりました。ここに、厚くお礼申し上げます。

次々回X線顕微鏡国際会議（2005年）の誘致の相談会について

東北大学科学計測研究所 渡辺 誠

名古屋での「X線結像光学シンポジウム」を利用し、15日の昼休みに標記の相談会を持ちました。参加者は16名でした。この会議は3年毎に開催され、1996年にドイツで、1999年にアメリカで開かれました。本ニュース No.10 にありますように2002年にはフランス（グルノーブル、ESRF）で開かれます。そして、2005年には日本という雰囲気があるようです。日本はX線顕微鏡の国際会議の経験はなく、大きなものとしては1989年のSRIの後に開催された栃木シンポジウムのみです。この相談会に集まった人達は、情報交換だけでなく研究交流やこれを機会に若手を育成することもできるので、やはり誘致しようということで意見が一致しました。そのためには組織、資金等について色々考えたり、お願いしたりすることが必要です。そこで出席者全員に世話人になっていただき、不肖私が代表に、そして青木氏（筑波大）が幹事になることのできることを了承を頂きました。また当日の出席者以外のX線顕微鏡の研究に携わっている方々にもなっていただくことにしました。この世話人会は誘致のためのもので、もし成功すれば新たに組織委員会が作られます。次回の相談会を2001年1月の放射光学会（広島大学）の場で持つことを考えています。また、2002年の提案までに1回氣勢を上げるべく研究会をやるという意見も出されました。

SRI-2000のお知らせ

編集部

本年8月21-25日に、Synchrotron Radiation Instrumentation の国際会議（第7回）がベルリンで開催されます。Abstract の締切は2月末です。詳しくは <http://sri2000.tu-berlin.de> を御覧下さい。

発行 X線結像光学研究会（代表 名古屋大学理学研究科物理学教室U研 山下広順）

編集部 東北大学科学計測研究所 軟X線光学計測研究分野 渡辺 誠

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 TEL: 022-217-5376, FAX: 022-217-5379,

E-mail : watamako@rism.tohoku.ac.jp