



# X線結像光学ニューズレター

No. 50 2019年12月発行

## Silicon Pore Optics: modular high performance X-ray optics

Marcos Bavdaz

European Space Agency

ESTEC, Keplerlaan 1, PO Box 299, NL-2200 AG Noordwijk, The Netherlands

### Introduction

After the launch of XMM Newton [1] and Chandra [2] attention soon focused on the mission to follow these great high energy observatories. Both have state-of-the-art X-ray optics on board, and any mission to follow them will have to embark an even more performant X-ray optics technology. Today, 20 years later, the European Space Agency (ESA) is studying the ATHENA mission [3], which will become the next generation X-ray observatory, complementing the ground and space observatories working in other wave-bands. The key enabling technology for ATHENA is the Silicon Pore Optics (SPO).

### The Resolving Power versus Area Density Challenge

To achieve its science goals, ATHENA requires X-ray optics, which deliver high angular resolution, twice better than that of XMM Newton, and a large effective area, three times larger than that of XMM Newton, while maintaining a low mass of the optics.

The ATHENA optics challenge is illustrated in figure 1, where the area density of X-ray optics flown to date is plotted against the resolving power, compared to

ATHENA. Despite the fact, that three different groups of X-ray optics technologies were used by the past missions, the area density shows a linear correlation to the resolving power.

The ATHENA requirements are clearly above this correlation line, indicating that the combination of low weight, large effective area and good angular resolution requires a novel X-ray optics technology.

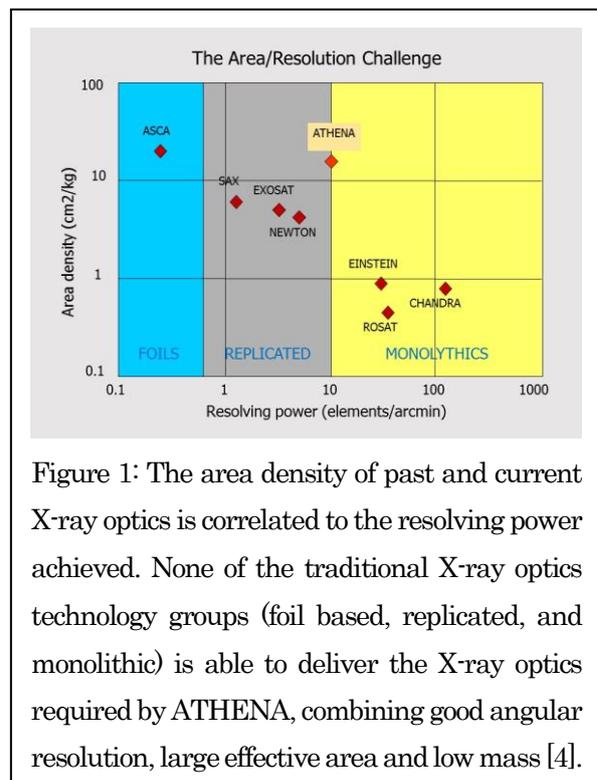


Figure 1: The area density of past and current X-ray optics is correlated to the resolving power achieved. None of the traditional X-ray optics technology groups (foil based, replicated, and monolithic) is able to deliver the X-ray optics required by ATHENA, combining good angular resolution, large effective area and low mass [4].

None of the existing X-ray optics technologies, be it foil based, replicated mirrors or monolithic Zerodur optics, can satisfy the demanding needs of ATHENA.

### The Silicon Pore Optics (SPO) Concept

The X-ray optics flown on the missions listed in figure 1 are based on very different technologies, but they have one important commonality: the individual X-ray mirror elements forming the optics are supported only on a few points, i.e. they are attached to the support structure via small, very localised areas. E.g., each of the 58 nickel mirror shells of the XMM Newton mirror module is attached on only 16 points to the support spider.

As shown in figure 2, the low number of support points, mostly on the edge of the mirror elements, is tasked to allow the mirrors to retain their natural shape, but at the same time makes them susceptible to deformations under gravity and other forces. Rather thick mirror elements are necessary, if a good angular resolution is to be achieved (e.g., the Chandra mirrors are 16 to 24 mm thick).

ATHENA requires very thin mirrors, not much thicker than a sheet of paper, to achieve the large effective area, while remaining within the allocated mass. X-ray mirrors that thin are very flexible, even if made of a stiff material, and are able to span only a short distance between support points.

By the introduction of the pore optics concept, the individual mirrors are linked to each other along lines, resulting in rigid and robust blocks. Each of these blocks, called stacks, consists of several dozens of mirror plates, connected to each other via ribs formed on the backs of the mirror plates. The pore optics concept requires very accurate machining of

the mirror surfaces and of the ribs connecting the individual mirror plates.

Monocrystalline silicon was chosen as the base material for the SPO. Silicon is a strong and stiff material with good thermal conductivity and exceptional uniformity and stability, as required for the fabrication of high performance lightweight X-ray optics. Benefiting from huge investments from the semiconductor industry, very high quality silicon wafers are available today, featuring super-polished, coplanar surfaces.

Hydrophilic bonding is used to join the mirror plates, without any glue, thereby avoiding differential thermal expansion problems.

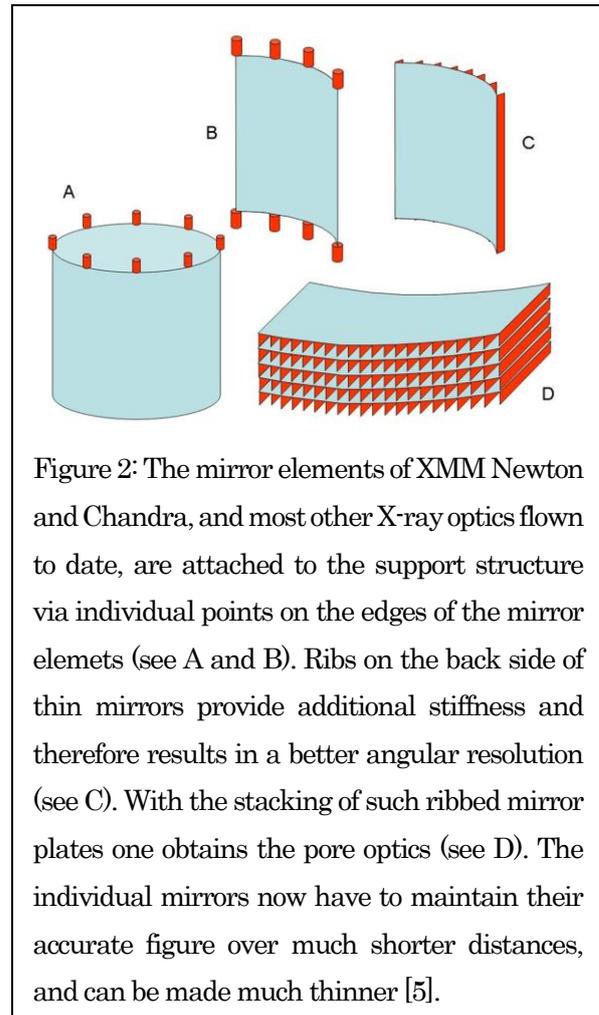


Figure 2: The mirror elements of XMM Newton and Chandra, and most other X-ray optics flown to date, are attached to the support structure via individual points on the edges of the mirror elements (see A and B). Ribs on the back side of thin mirrors provide additional stiffness and therefore results in a better angular resolution (see C). With the stacking of such ribbed mirror plates one obtains the pore optics (see D). The individual mirrors now have to maintain their accurate figure over much shorter distances, and can be made much thinner [5].

## Technology Spin-in from the Semiconductor

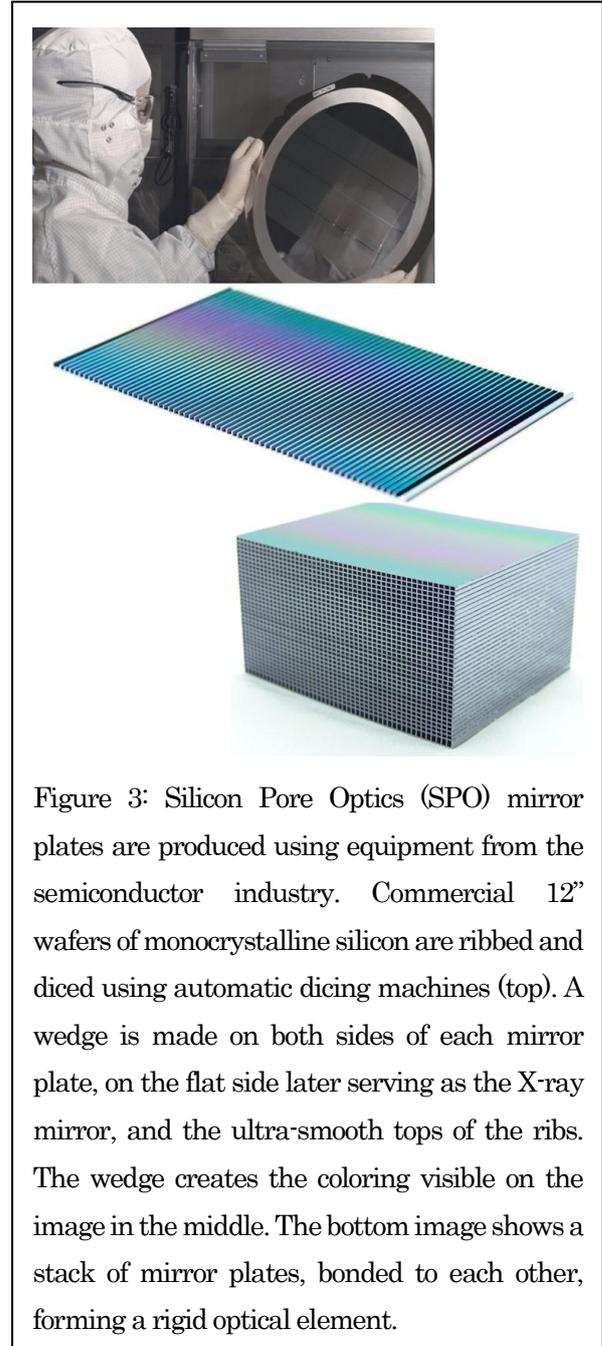
### Industry

Since the beginning of the SPO development [6, 7] a holistic development approach was followed. The SPO technology had to satisfy three requirements: (1) deliver the required performance (effective area, angular resolution), (2) be compatible with the expected environmental conditions (launch loads, long duration operation in space), and (3) be cost effective to implement. This approach is ensuring a smooth transition of the SPO technology from the development to the flight model production phase [8-13].

Technology spin-in was an essential element of the SPO development. Highly sophisticated equipment, materials and processes have been developed for the semiconductor industry, and form the backbone of the SPO production.

The mirror plates are made of high quality 12" wafers, which effectively are delivered with the surfaces super-polished and figured to the requirements of ATHENA. These wafers are oxidized, and then automatically grooved and diced by an industrial dicing machine, as shown in figure 3. This process retains the high quality finish on the reflective side of the mirror plates, and also on the tops of the ribs generated by the grooving. In the following a wedge is made on both sides of the mirror plates, by wet etching of the oxide layers. This wedge is required to make the stacked mirror plates confocal. Finally, the mirror plates are coated with a reflective layer of Iridium. This layer is patterned, leaving the areas in contact with the adjacent plates uncoated.

The mirror plates are then assembled into stacks, using a stacking robot specifically developed for this operation, see figure 4.



The stacking operation requires high cleanliness, and is conducted in a clean tent inside a clean room. The operator controlling the equipment is located outside the cleanroom, in a remote control area. The stacking is largely automatised, and only a few minutes are required to add a mirror plate to the underlying stack. The mirror plates are elastically deformed to conform to the shape of the forming mandrel, onto which the stack is built. Each new plate bonds to the

preceding plate within seconds, and can be released from the pre-forming tool. The last step of mounting a plate is the inspection of the achieved figure by a fringe reflection metrology system. The stacking robot is highly instrumented, involving auto-collimators, cameras, robotic arm, hexapod and safety systems.

Once assembled into stacks of typically 35 mirror plates, mirror stacks form a rigid and stable optical element. Due to the large number of mirror plates, bonded together via the separating ribs, the elastic deformation of the mirror plates is locked, and the shape represents a close copy of the shape of the forming mandrel.



Figure 4: The assembly of the mirror plates into stacks is performed by automatic stacking robots, remotely controlled by operators. The time required to mount a mirror plate is only a few minutes, and the figure of each plate is inspected after mounting, using fringe reflection metrology (located in the blue box on the right). The surfaces of the mirror plates are so smooth, that they are fixed to each other by hydrophilic bonding. No glue is used to assemble the mirror stacks.

### Modular X-ray Optics

Four stacks are assembled into a mirror module, using two lateral invar brackets, as shown in figure 5. These brackets provide three hard points, to which the isostatic mounting system is connected.

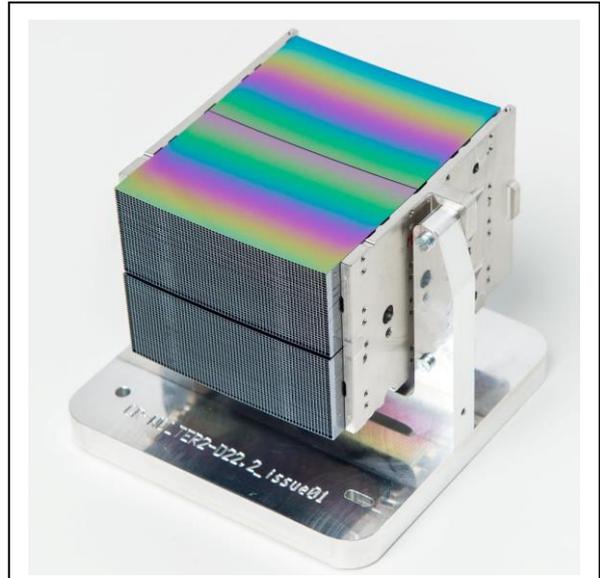


Figure 5: A Silicon Pore Optics mirror module is a Wolter-I optical element, reflecting the incoming X-rays twice, and bringing them to a common focus in the focal plane several meters away. The SPO mirror module shown consists of four stacks of mirror plates, two primary and two secondary reflectors. The stacks are held in accurate position by two brackets, which also serve as interface to the kinematic mount of the mirror module. The colors visible on the top plates are caused by interference of light in the wedged oxide layer on the surface.

The assembly of the mirror modules is performed in a synchrotron radiation facility. Using an X-ray pencil beam the positions of the four stacks are accurately adjusted, before glue is injected to fix the stacks to the brackets (glue is used between the rigid stacks and the brackets, not between the sensitive plates within the stack).

Each SPO mirror module is a complete Wolter-I optical system.

### Developing the Largest X-ray Optics Ever Built

ATHENA requires a 2.4 meters diameter optics, consisting of about 700 SPO mirror modules. A method and the associated tooling were developed to accurately co-align the mirror modules, and mount them onto an optical bench, in order to produce a single focus [14], see figure 6.

The 700 mirror modules on their optical bench form the Mirror Assembly Module (MAM) of the ATHENA mission. The MAM is mounted to the ATHENA spacecraft structure using a hexapod system, which allows tilting the optics to select the instrument of choice during the ATHENA operations. As a consequence, the two complex detector instruments can remain static, significantly simplifying the instrument accommodation.

### Potential for Ground and Space Applications

The SPO technology is enabling the ATHENA mission, and was selected for the Arcus mission, studied by NASA as a Medium Explorer candidate [15]. At the same time, SPO also has significant potential for ground applications.

The cost effective production and high performance of the SPO makes its use in many areas attractive. Medical diagnostics could benefit from the introduction of this imaging optics to replace simple shadow casting and thereby reduce the radiation exposure of patients. SPO could expand the possibilities of material testing with X-rays, and improve the signal to noise of imaging X-ray fluorescence and diffractometer equipment. Applications in the security inspection area could

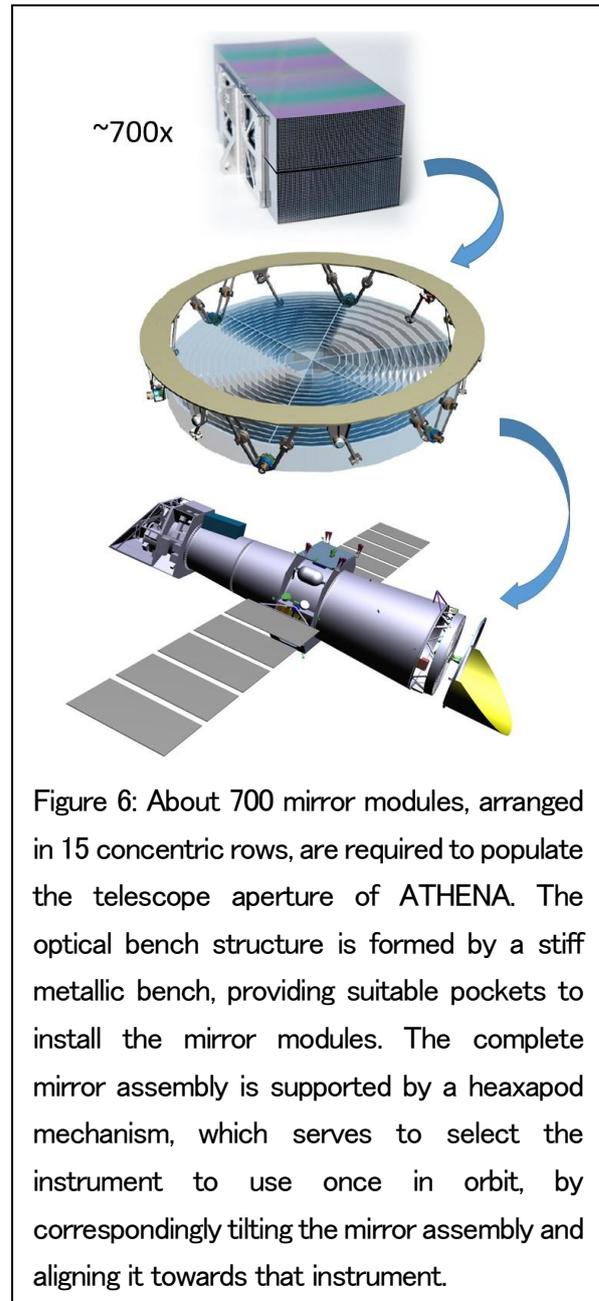


Figure 6: About 700 mirror modules, arranged in 15 concentric rows, are required to populate the telescope aperture of ATHENA. The optical bench structure is formed by a stiff metallic bench, providing suitable pockets to install the mirror modules. The complete mirror assembly is supported by a hexapod mechanism, which serves to select the instrument to use once in orbit, by correspondingly tilting the mirror assembly and aligning it towards that instrument.

take advantage of the SPO technology, as could laboratory instrumentation.

### Acknowledgements

The ATHENA optics development is a team effort, where industry, academic institutions and ESA work together, complementing each other. The work presented in this Letter would not have been possible without the expertise and effort of all those involved.

## Reference

- [1] Jansen, F., et al, 2001, Astronomy and Astrophysics, vol. 365, no. 1, pp. L1–L6
- [2] O'Dell, S., et al, 1998, Proc. SPIE, Vol 3444, pp. 2–18
- [3] Nandra, P. et al, <http://www.the-ATHENA-x-rayobservatory.eu/>
- [4] Bavdaz, M., et al, Hindawi Publishing Corporation X-Ray Optics and Instrumentation Volume 2010, Article ID 295095
- [5] Bavdaz, M., et al, 2010, Proc. SPIE, 77321E
- [6] Bavdaz, M., et al, 2008, Patent US 7,321,127 B2
- [7] Beijersbergen, M., et al, 2004, Proc. SPIE, 0277-786X
- [8] Collon, M., et al., 2019, Proc. SPIE, 111190L
- [9] Barriere, N., et al, 2019, Proc. SPIE, 111190J
- [10] Wille, E., Bavdaz, M., Ferreira, I., et al. 2018, Proc. SPIE, 106993L
- [11] Keek, L., et al, 2019, Proc. SPIE, 111190H
- [12] Bavdaz, M., et al, 2019, Proc. SPIE, 111190D
- [13] Vacanti, G., et al, 2019, Proc. SPIE, 111190I
- [14] Valsecchi, G., et al, 2019, Proc. SPIE, 111190M
- [15] Smith, R., et al, 2019, Proc. SPIE, 111180W

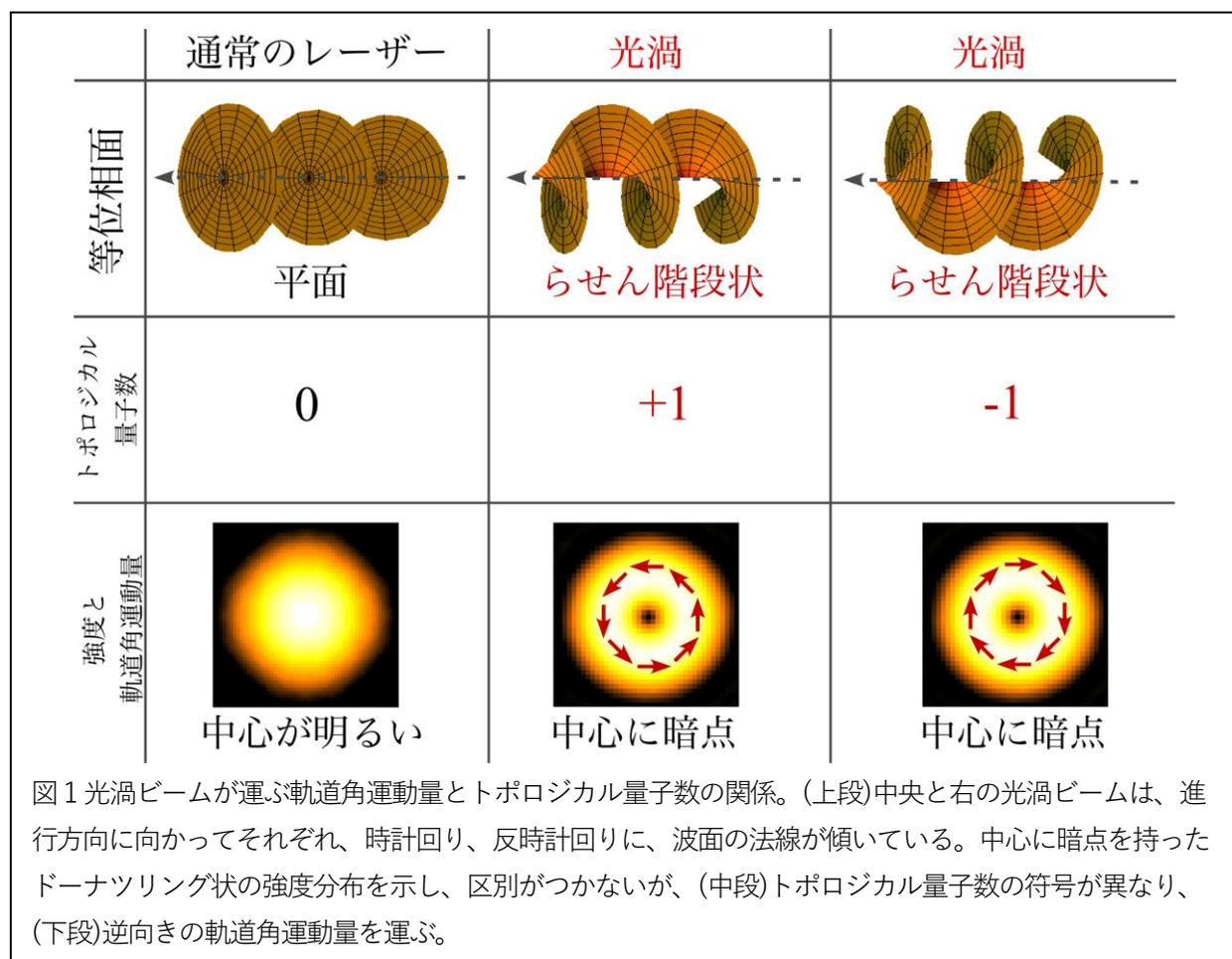
## X線軌道角運動量イメージング

理化学研究所 香村芳樹

光の波動関数の位相情報を変調させた構造光の利用が、特に可視光領域を対象として加速度的に進んでいる。その代表例が光渦である。中心が暗い光渦の特性と蛍光体発光の強度依存性を駆使して、波長より二桁下の解像度を実現した超解像技術が開発され[1]、生命科学などのツールとして目覚ましい進展を見せている。X線領域での構造光の研究は少ないものの、光渦は超解像イメージングで不可欠な要素であり、X線の軌道角運動量と物質のスピンとの相互作用が関わる新規の分光研究[2]のプロブ光としての利用も期待されている。本稿では、X線の光渦光の波面の測定と、欠陥の入った結晶中の格子面でのブラッグ反射によって生じるX線の光渦光の形成の両方について報告する。

光渦は、中心軸のまわりにらせん階段状の波面をもち、波面に沿って一周すると波長の整数倍ずれた波面につながる構造をもっている(図1)。光渦は、渦の中心の強度がゼロで、中心軸まわりに光が軌道角運動量をもつ、という特徴を有する。軌道角運動量は、らせん階段状の波面の回転数と対応する整数値のトポロジカル量子数 $l$ で指定される飛び飛びの大きさをもつ。

このような光渦の特徴を踏まえ、光渦を観察するため用いたラジアル・ヒルベルト(RH)変換顕微鏡の実験結果を報告する[3]。RH変換は、信号処理において複素数信号の実部と虚部との変換を動径方向に行うように拡張したものである。この手法を用いる



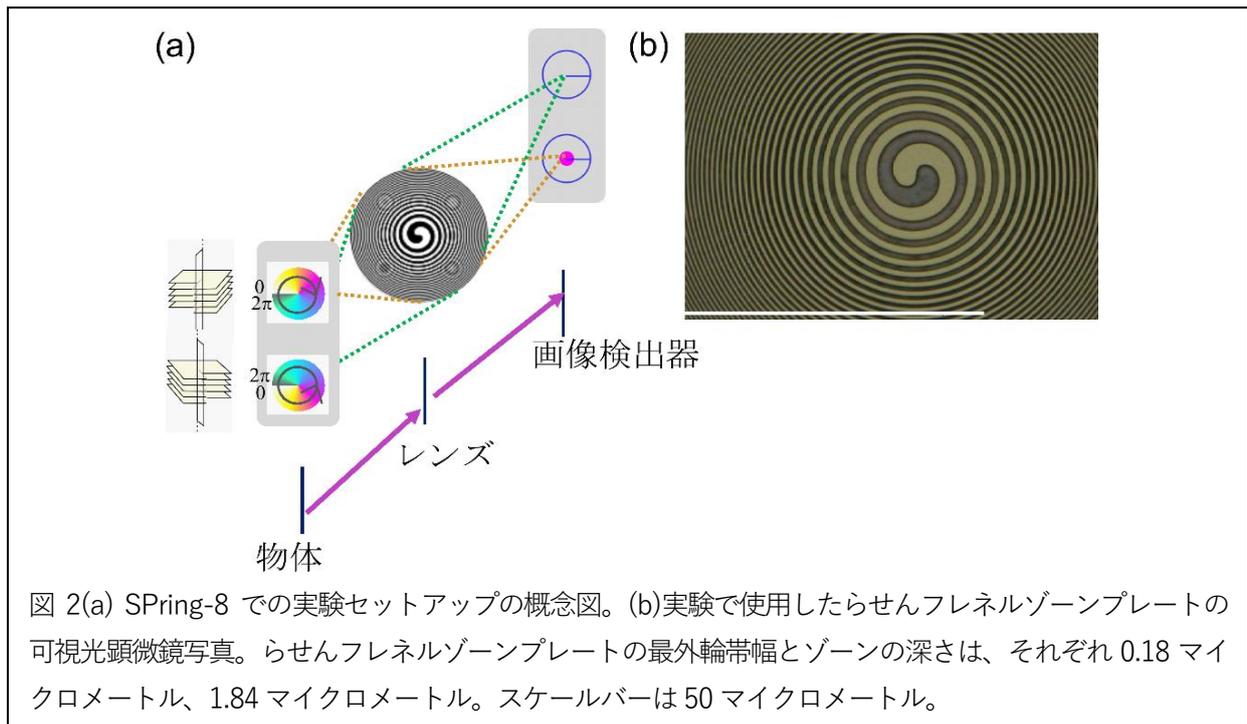


図 2(a) SPring-8 での実験セットアップの概念図。(b)実験で使用したらせんフレネルゾーンプレートの可視光顕微鏡写真。らせんフレネルゾーンプレートの最外輪帯幅とゾーンの高さは、それぞれ 0.18 マイクロメートル、1.84 マイクロメートル。スケールバーは 50 マイクロメートル。

ことで、試料の複素透過率の実空間での振幅分布にフィルターをかけ、試料の端などの空間変化つまり微分量の大きな領域を高感度で観察することができる。本研究ではこの手法により、微分量だけでなく、X線の軌道角運動量成分が識別できることを世界で初めて示した。

RH変換顕微鏡において、フーリエ空間でのフィルター機能と実空間への結像機能を果たすため、らせんフレネルゾーンプレート(SFZP)[4]を用いた(図2a、2b)。らせんフレネルゾーンプレートは、回折を利用したフレネルゾーンプレートに、一周すると位相が $2\pi$ まわらせん位相を加えた光学素子である。向きを反転させて、トポロジカル量子数の符号を $l = \pm 1$ と変えながら、対物レンズとして用いることができる。

実験は、SPring-8で7.71keVのX線を用いて行われた。試料として、位相が0から $2\pi$ まで連続的に変化する位相勾配を持つ4つのらせん位相板をシリコン基板上に作製し、X線透過により、隣どうしで、逆符号の量子数 $m$ (※SFZPによるトポロジカル量子数とは別物)を有する光渦を生成させた(図3a)。この試料観察のために、RH変換顕微鏡を構築した。この結果、物体下流での量子数 $m$ と、SFZPによる量子数

$l$ が逆符号の整数となる場合のみで、トポロジカル量子数が差し引きゼロになり中心の暗部が消え、顕微鏡像上に明るいスポットが生じるとの理論予言を実証することに成功した(図3b)[3]。この成果は、Juchtmann他の理論[5]で $||=1$ の場合のみで予言されていた結果を一般の $l$ と $m$ に対して拡張しただけでなく、物体を通った光に生じる軌道角運動量をその空間的な分布も含めて、一画像で取得できるというRH変換顕微鏡の優れた性質を極めてシンプルに示している。

次に、第二の実験として、らせん転位を含んだ炭化ケイ素(SiC)結晶にX線を照射してブラッグ反射を起こし、X線波面に光渦が生成されることを示した結果について述べる。この実験では、7.71keVのX線によってSiC(0004)面でのブラッグ反射を起こし、らせん転位が存在する領域と存在しない領域からのブラッグ反射波を重ねて干渉パターンを生成した。

観測された干渉縞を図4に示す。フォークパターンが観察され、特異点を境にした干渉縞の本数の差(図4では1本)が、光渦によるトポロジカル量子数に対応している。X線エネルギーを6.5、7.71、9keVと三通り変え同様の干渉縞を撮影した。また、X線エネルギーを7.71keVに保ち、反射面をSiC(0004)

面、SiC(0008)面、SiC(00012)面と三通り変えて撮影した。反射波上の光渦のトポロジカル量子数は、らせん転位のバーガーズベクトルで規定され、X線の結晶面に依存せず、X線エネルギーによらない保存量だった。干渉計による測定は、試料と検出器間の回折によりボケており、特にらせん転位密度

が高い領域での観察は難しい。これに対し、RH変換顕微鏡法による測定は、結像観察であるため、らせん転位密度が高い領域の観察に有利である。

本研究により、炭化ケイ素の結晶試料にX線を照射し、ブラッグ反射を起こさせると、内在するらせん転位がX線の波面に転写され、広いエネルギー範

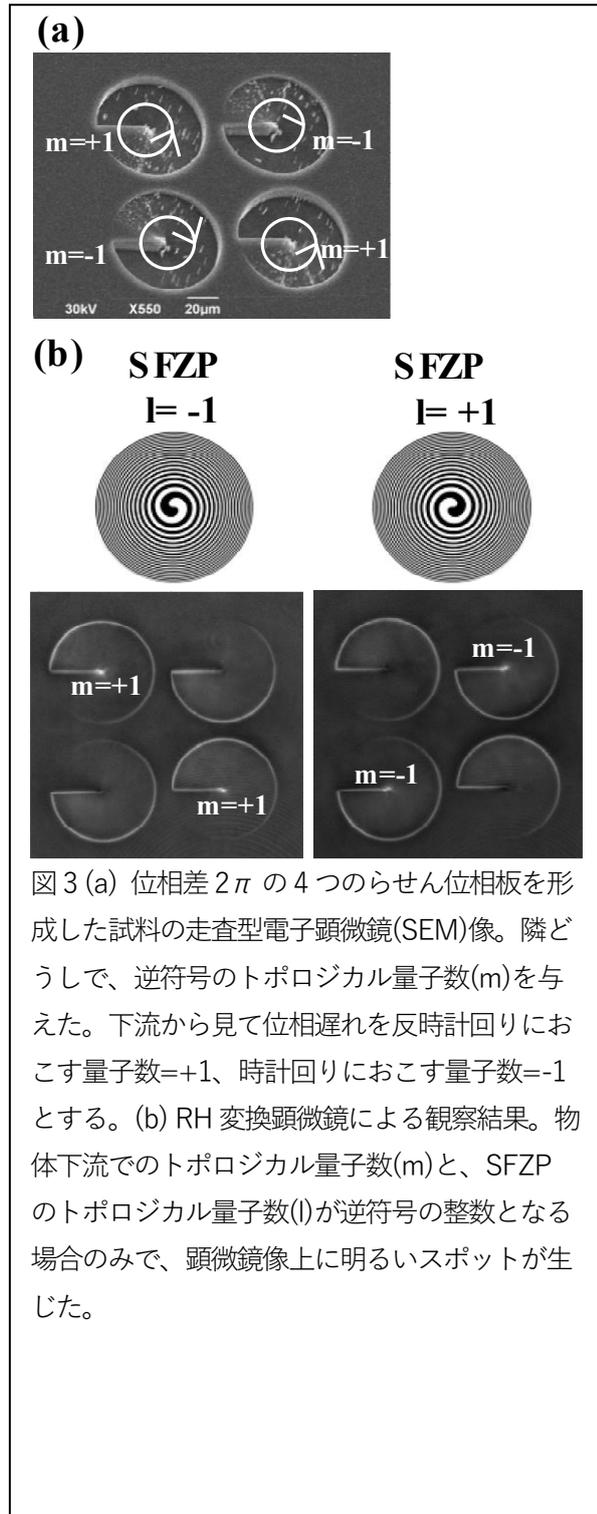


図3 (a) 位相差  $2\pi$  の4つのらせん位相板を形成した試料の走査型電子顕微鏡(SEM)像。隣ど  
うして、逆符号のトポロジカル量子数(m)を与  
えた。下流から見て位相遅れを反時計回りにお  
こす量子数 $=+1$ 、時計回りにおこす量子数 $=-1$   
とする。(b) RH変換顕微鏡による観察結果。物  
体下流でのトポロジカル量子数(m)と、SFZP  
のトポロジカル量子数(l)が逆符号の整数となる  
場合のみで、顕微鏡像上に明るいスポットが生  
じた。

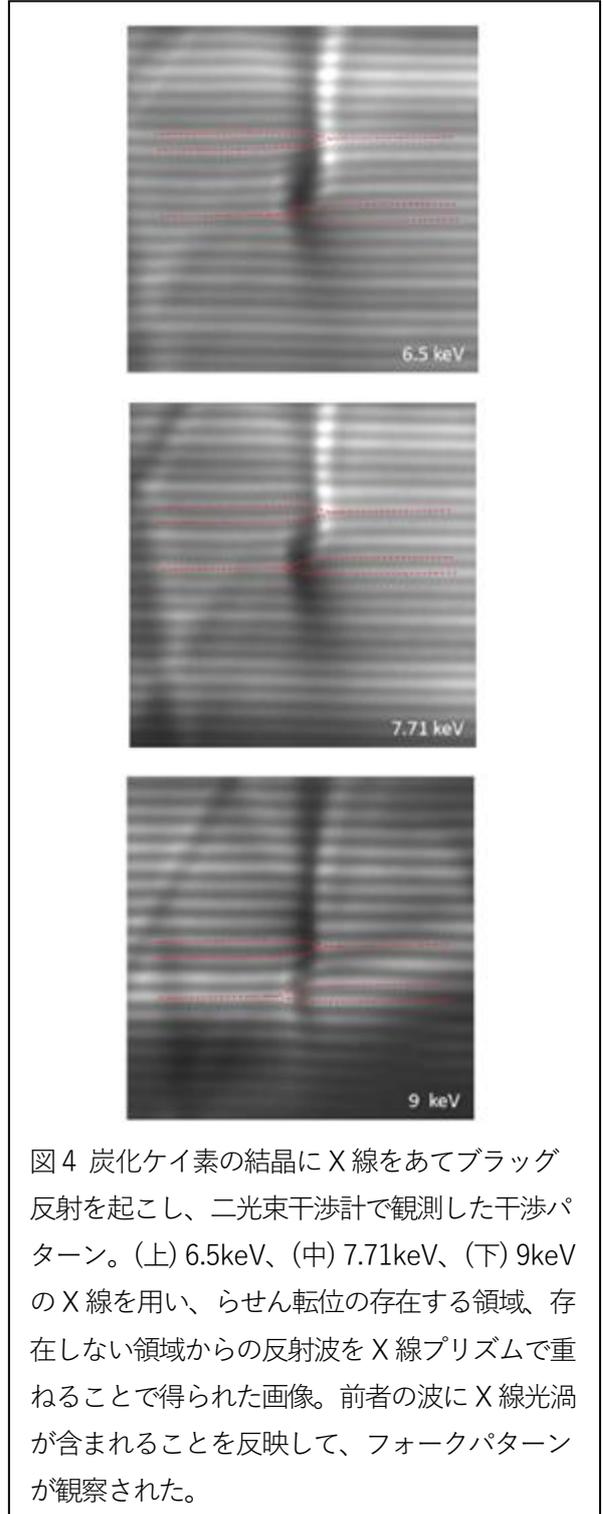


図4 炭化ケイ素の結晶にX線をあてブラッグ  
反射を起こし、二光束干渉計で観測した干渉パ  
ターン。(上) 6.5keV、(中) 7.71keV、(下) 9keV  
のX線を用い、らせん転位の存在する領域、存  
在しない領域からの反射波をX線プリズムで重  
ねることで得られた画像。前者の波にX線光渦  
が含まれることを反映して、フォークパターン  
が観察された。

困で光渦を生成できることが示された。この光渦の生成素子はエネルギー可変であるため、X線の軌道角運動量と物質のスピンとの相互作用による分光研究にも最適である。

### 今後の展望

我々は、カイラリティを有する物質の背面に生成した光渦による、トポロジカル量子数分布を観察できるRH変換顕微鏡を開発した。

今後は、RH変換顕微鏡を原子レベルの転位の観察に応用したい。結晶内の格子歪みは、ブラッグ反射を起こした後の回折波に位相変調を生じさせる。回折波の光軸にRH変換顕微鏡を組めば、原子レベルで刃状転位やらせん転位を観察できる。転位の分布やダイナミクスは、材料の物性の発現の仕方、例えば金属の剛性[6]やLEDの発光効率[7]、電子デバイスとしての効率[8, 9]などの物性と密接に関連している。RH変換顕微鏡法は、これら二種の転位のみを試料全体から強調して可視化でき、広い用途が期待される。

### 謝辞

本研究の一部は、関学、量研との共同研究によってなされた。澤田桂氏、大和田謙二氏、綿貫徹氏、水牧仁一郎氏、石川哲也氏との共同研究により達成された。

### References

[1] S. W. Hell and J. Wichmann, Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated emission depletion microscopy. *Opt. Lett.* 19, 780 (1994), S. W.

Hell, Toward fluorescent nanoscopy. *Nature Biotechnology* 21, 1347 (2003).

[2] M. v. Veenendaal and I. McNulty, *PRL* 98, 157401 (2007).

(赤外線の研究) C. T. Shmeigelow, et al.,

*Nature Comm.* 7: 12998, 1 (2016).

[3] Y. Kohmura, et al., Microscope for X-ray orbital angular momentum imaging. *arXiv:1809.05138v1* (2018).

[4] A. Sakdinawat et al., Soft-x-ray microscopy using spiral zone plates. *Opt. Lett.* 32, 2635 (2007).

[5] R. Juchtmans et al., Spiral phase plate contrast in optical and electron microscopy. *PRA* 94, 023838 (2016).

[6] J. Liu et al., Dislocation Strengthening without Ductility Trade-off in Metastable Austenitic Steels. *Sci. Rep.* 6, 35345 (2016).

[7] S. Nakamura et al., The role of structural imperfections in InGaN-based blue light emitting diodes and laser diodes. *Science* 281, 956 (1998).

[8] D. Nakamura et al., Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals. *Nature* 430, 1009 (2004).

[9] Y. Yamamoto et al., Low-dislocation-density 4H-SiC crystal growth utilizing dislocation conversion during solution method. *Applied Physics Express* 7, 065501 (2014).

## 会議報告

# "SPIE Optics + Photonics 2019 / Optical Engineering + Applications"

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 坂尾太郎

2019年のSPIE Optics + Photonics会議は、8月11日から15日にかけて、米国カリフォルニア州サンディエゴで開催された。当ニュースレターの読者の方はよくご存知と思うが、この会議は国際光工学会（The International Society for Optical Engineering；SPIE）が毎年開催している、光学および関連する科学・技術についての大規模な研究集会で、参加者は全体で4,000人を超える。会場のSan Diego Convention Centerは、サンディエゴ市街南側の海岸沿いに位置し、すぐそばにはGaslamp Quarterと呼ばれる、サンディエゴの古い町並みが残る景観保護地区が広がり、飲食店も多い。また、大リーグサンディエゴ・パドレスの本拠地、ペトコ・パーク球場も目と鼻の先である。

今年のSPIE Optics + Photonics会議は、(1) Nanoscience + Engineering、(2) Organic Photonics + Electronics、および(3) Optical Engineering + Applications、という3分野から構成され、各分野ごとに複数のセッションが並行して開催された。中でも3番目に挙げたOptical Engineering + Applicationsは、セッション数が総計46を数え、読者諸氏に関係が深い、X線光学やX線検出器のセッションに限っても10程度を数える、この会議の中核的な存在である。シンクロトン放射光施設やX線自由電子レーザー施設を舞台とする、地上でのX線光学技術・X線計測技術や、天文観測衛星に搭載されるX線観測装置技術などについて、この1年の進歩や現状を把握するのに有効なセッションが続く。会議の様子やプログラム、ハイライト写真などがSPIEの下記サイトに紹介されているので、こちらからある程度の雰囲気は掴んでいただけるかと思う：

<https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-photonics/highlights-photos->

[and-more?webSyncID=e64db1c7-7620-c89a-0ce4-6e9e6ec7a49d&sessionGUID=ab6a0cba-d059-329a-d883-c9d902bc9993](https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-photonics/highlights-photos-and-more?webSyncID=e64db1c7-7620-c89a-0ce4-6e9e6ec7a49d&sessionGUID=ab6a0cba-d059-329a-d883-c9d902bc9993)

私は衛星から太陽コロナをX線で撮像観測するための、精密Wolterミラーの開発・研究を行なっており、このSPIE会議には過去5年ほど、毎年参加している。これまでに飛翔したX線天文衛星Chandraや、太陽観測衛星「ようこう」・「ひので」等に搭載された、秒角程度の角分解能を持つ精密Wolterミラーは、米国Goodrich社が円環形状のガラス基板の内壁を直接、精密に研磨する方法で製作してきた。しかし同社はすでにWolterミラーの製作から撤退してしまい、一体物の大型精密ミラーは世界的に製作できない状況となっている。これに替わる潮流として、Si基板の表面を精密研磨する（あるいは半導体用Siウエハを利用する）ことでWolter表面を創成し、さらに個々の独立した大量のミラーセグメントをアライメントを取って組み上げることで、全体として円環・多重ネスト形状をしたメートル・サイズの大型



図1：会場のSan Diego Convention Center周辺の様子。右手側に見える背の低い建物が会議場。会議場の裏側に、サンディエゴの海岸がひろがる。

Wolterミラーを構成するアプローチが検討されている。欧米ではこのような方針のもと、欧州宇宙機関ESAのAthena（最近の公開情報では2031年打上げ予定）や米国NASAのLynx（計画中）といった大規模X線天文ミッションに向けた、大型・軽量X線ミラーの開発検討が精力的に進められている。

私の手がけているWolterミラーは、0.5 keVから10 keV程度のエネルギー域での太陽X線観測を目指している。このような比較的エネルギーの低いX線域では、太陽コロナからのX線フラックスは他の天体に比べて桁違いに高いため、上述のX線天文ミッションのような大型ミラーは必要としない（有効面積でせいぜい1-2 cm<sup>2</sup>程度）。その一方で、(1) コロナ中のプラズマの電磁流体活動が形作る構造を空間分解して観測するための、秒角からサブ秒角の高い角分解能と、(2) 数桁にわたる輝度コントラストを持つX線コロナの明暗さまざな領域を撮像するための低散乱特性、をあわせ持ったミラーが必要である。このような精密Wolterミラーを実現するため、山内和人先生・松山智至先生をはじめとする、大阪大学大学院工学研究科の超精密X線加工・計測グループのご協力をいただき、検討を進めている。その縁もあって、SPIE会議では地上X線技術と衛星など飛翔体のX線機器技術の両方のセッションに顔を出すようになった（前者に参加する方が多いのだが）。以下、それぞれの分野の講演から、ごく一部をかいつまんで私見を交えながら（と言うか私見だけで）紹介したい。

地上でのX線光学技術・X線計測技術に関しては、SPRING-8放射光施設やSACLA X線自由電子レーザー施設稼働していることも背景にあるのか、日本のグループによる研究活動や成果が、国際的に見てもはっきりと抜きん出ている印象を受ける。ここで展開されているのは、KB（Kirkpatrick-Baez）ミラーなど、極めて高精度のシンクロトロン集光ミラーを組み合わせることによって色収差を除去した光学系の実現（Advanced KB光学系；阪大・松山氏）であったり、形状可変なconcave/convexミラーのペアでX線を反射させることでNumerical Apertureを可変にできる

（光学素子等のセッティングを変えずに回折限界の集光スポット径を変えられる）光学系の構成（阪大・山口氏）など、ビームラインの新たな利用価値の創出とも言える、特色を持った光学系の開発研究や、これら光学系に不可欠な、高精度ミラーの開発（JTEC・一井氏）だったりする。X線光学系のアライメント計測・調整には、Talbot干渉計測がなかば標準手法として使われていて（JASRI・小山氏など）、X線という「直線」（幾何光学的）というイメージがこびりついてしまっている私などには非常に斬新で面白い。さらに、SACLAのone-shotずつ不連続的に放射されるX線に対して、集光スポットサイズを10 nm未満に絞り込む、大パワー密度集光をどのように実現するか、という課題（スポットサイズの計測や光学素子のアライメント調整）の解決に向けても、大変興味深い講演があった。One-shotごとに焦点面への入射位置が微妙に異なるSACLAのX線ビームに対し、光路中に挿入したサンプルによるコヒーレント散乱で生ずるスペックルパターンを用いて集光KBミラーのアライメント情報と集光スポットのプロファイル情報を取得する手法の報告（阪大・井上氏）や、焦点面に挿入した金属（Cu）フィルムからの蛍光X線の空間コヒーレンシーを計測することによる、強度相関法を用いた集光スポットサイズ導出（1950年代に恒星シリウスの視直径を求めたのが、まさにこの方法だったと！）の原理実証計測（阪大・中村氏）など、X線を完全に可視光と同様の電磁「波」と見なせる感覚や、それに基づく発想は、いつもながら私には印象的である。

電気鋳造を用いた精密回転楕円ミラーの製作技術の進展も目覚ましい。軟X線の精密集光を目的とし、マンドレルから電鋳で型取りして製作した、直径10 mm、筒長40 mm程度のニッケル円筒の内壁を回転楕円ミラーとして使用し、1 μm未満のスポットサイズでの集光が達成されている。この精密電鋳技術の報告（夏目光学・久米氏）や、このミラー技術を用いた、SACLAの軟X線ビームラインでの顕微鏡光学系の構築（回転双曲面・回転楕円面によるWolter I型光学系；東大・江川氏）の報告があった。これに加えて、ミラー精度のさらなる向上を目指し、

円筒内壁を直接研磨するための、有機研磨剤を用いた新しい加工手法の開発研究(加工ヘッドを5 mm程度に小さくし、形状修正が一般に難しい1-0.1 mm程度の空間スケールに対する加工性の向上を図る；東大/夏目光学・松澤氏)や、X線CTを用いた円筒内壁の健全性診断技術(0.2 mm程度の微小なキズの検出)の報告(東大・清水氏)など、活発に研究が進展している様が見て取れた。

地上X線技術と並んで、飛行体搭載のX線機器技術についても、このSPIE会議で議論される。地上X線技術の講演は、実験に先立つ解析検討や数値解析によって計測の成否や計測精度を確認し、成立性を把握した上で実験に臨む、いわゆる「始めた時には終わっている」式に物事を進めているのがわかる、気持ちの良いものが多い。しかし残念なことに飛行体関係の講演では、ミッションの定期報告やただの宣伝になっているものがしばしば見受けられ、正直つまらないものも少なくない。講演時間の半分以上が「イントロ」に費やされる講演とか、この1年の進展は特にありません、で実質的に終わる講演とか、一体どうなってるのだろうか？(日本の講演ではありません幸いなことに。)プログラムが、大型衛星ミッションとそれに連なる装置開発・地上設備の現状を中心に組み立てられる傾向にあるため、このようなことになってしまうのは仕方ないのかも知れないが。。

衛星X線機器では、Lynx計画に向けてNASA GSFC (Goddard Space Flight Center) のグループが進めている、Si基板を精密研磨したWolterミラーの開発が目を引く。100 mm角程度の薄い(厚み1 mm弱) Si基板2枚に回転放物面・回転双曲面をそれぞれ成形し、両基板のアライメントを取ることで、4.5 keVのX線に対する集光スポットサイズが、HPD (Half Power Diameter) 値で1.2秒角に到達したという報告があった。このHPD値のうち、計測時のミラー基板の自重変形分は約1.1秒角と見積もられ、これを除くと無重力下での集光は0.6秒角HPDが期待される。形状誤差PSDは、衛星搭載のX線望遠鏡として過去最高の結像性能を誇るChandra衛星のミラ

ーに匹敵するとのことであった(GSFC・Zhang氏)。一方、同グループの後続の講演(GSFC・Riveros氏)で言及されたミラーの形状修正誤差は、Chandra相当のWolter表面を実現するにはいささか大きすぎるようにも思われ、達成したと報告された集光性能と、形状修正性能の関係が「???'となったところで楽しいディナー会の集合時刻となったので会場を後にした。不明な点はあったが、X線天文用ミラーの開発に近年大きな進展を見せているグループであり、今後の動向も注目に値すると思う。

来年のSPIE Optics + Photonics会議は、同じ会場で8月23日から27日の日程で開催予定である。

最後に、本稿で紹介した講演の報告は、私個人(坂尾)の理解によるものであり、内容に誤りや不正確な点があれば、全て私の責任です。また、会議ではポスターセッションが2日間開催されましたが、ポスター講演については紹介を割愛させていただきました。



X-RAY  
IMAGING OPTICS



## 編集部より

---

原稿をご提供いただいた、M. Bavdas 先生、香村先生、坂尾先生に感謝いたします。宇宙観測用光学系・検出器の主要な国際学会である、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation が、2020年6月14日から19日にかけて、パシフィコ横浜で開催される予定です。みなさん、ふるってご参加下さい。ニュースレターを通じて、みなさまには新鮮な話題をタイムリーにお知らせしていきたいと思っております。今後ともよろしく願いいたします。

(文責・松本浩典)

### 【メーリングリスト（登録メールアドレスの変更などについて）】

本ニュースレターは原則、メーリングリスト (xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp) によるメール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部 (xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp) までご連絡ください。メーリングリストは、研究会のお知らせなど、会員全員に情報を配信したいときなどにも便利なので、積極的にご活用ください。

---

X線結像光学ニュースレター  
No. 50 (2019年12月)

発行 X線結像光学研究会  
(代表 兵庫県立大 籠島靖)

編集部 山内和人 (大阪大)、齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、  
松本浩典 (大阪大)、東口武史 (宇都宮大)  
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

---