

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610051

研究課題名(和文)ダイヤモンド単結晶による次世代型X線干渉望遠鏡の開発

研究課題名(英文) Research and Development of an X-ray Interferometric Telescope using Diamond Crystals

研究代表者

武井 大 (Takei, Dai)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：10709372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、光学理論の展開と放射光による追従実験から、X線の「横滑り」という新しい概念の光物理現象が発見された。X線が歪んだ単結晶にブラッグ角度付近で入射すると、「ベリー位相」の効果による巨視的な伝搬を経て結晶の縁から出射する。横滑り現象を駆使すれば、反射や屈折など従来の光学系では成し得ない、新たなX線の光路や干渉計、望遠鏡を実現できる可能性がある。そこで、本研究にて同現象の本質的な理解に踏み込み、確実かつ高いS/Nで信号を引き出す手法を開発し、新たなX線導波技術としての基礎を築いた。

研究成果の概要(英文)：The range of X-ray applications especially in space science is still far from its potential because we currently only have small choices of practical X-ray optics. We thus focused on the development of an unprecedented optical element based on X-ray translation by Berry's phase. This effect was recently discovered in the field of synchrotron science, and has been expected to realize a large change of a beam trajectory with no change of wave-front direction, yielding a parallel shift of an optical axis that cannot be achieved using an existing optical element based on reflection/refraction in X-rays. Our study here shows a new aspect of Berry's phase, and successfully developed such an X-ray waveguide that should be a great seed for opening up a frontier of future high-energy experiments.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線光学 望遠鏡 Berry位相 横滑り現象 放射光 SPring-8 単結晶 干渉計

### 1. 研究開始当初の背景

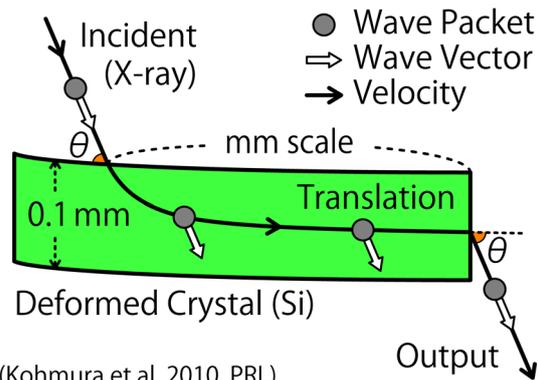
ブラックホールは現代物理学を象徴する重要な天体である。超高密度な星は光すら脱出できない領域を作り、周囲の高温プラズマはX線で明るく輝く。その描像は様々な観測から支持されてきたが、確固たる証明として光が脱出できない「穴」自体が写真におさめられた事は無い。それは現時点で人類が持つX線望遠鏡の性能が足りないからである。

望遠鏡の理論的な角度分解能は波長/口径で決まる。しかし、理論的な限界性能で撮像するには、波長が約1/4以下の精度で作られた集光光学系が必要となる。波長がオングストローム程度のX線に対してこれを達成するのは技術的に非常に難しく、現状では天体からのX線が持つ豊富な情報をほとんど引き出せていないという問題を抱えている。

そこで注目すべきは光干渉技術である。同じ位置から出た光は可干渉な性質を持ち、それら光を重ねると干渉縞(像)ができる。干渉縞の鮮明度はビームの光路差と光源サイズに対応するため、結果として条件を変えながら得られた結果を逆フーリエ変換する事で波長を物差しに光源の輝度分布がわかる。

光干渉計測は電波天文学の分野では既に日常的に応用され、一方でX線干渉計測も放射光による精密測定分野で目覚ましい発展を遂げてきた。しかし、同技術をX線望遠鏡に応用するには、まだ多くの課題が残る。最大の問題は、X線干渉縞を取得するため光を浅い角度で重ねる必要から、既知の検出器と光学系を組み合わせるだけでは極めて長い望遠鏡を必要とする事である。2000年初頭に出たX線干渉望遠鏡のアイデア(Cash+2000)を元にNASAを主体とする研究チームが調査した結果、ブラックホールを撮像するには長さ100kmを超す巨大宇宙望遠鏡が必要と推定された(Gendreau+2003)。人工衛星でこれを達成するには超高精度の編隊飛行を余儀なくされ、これまた技術的な困難を極めた。

効果的な打開策が見えない中、2010年に新しい物性現象が発見された。歪んだ単結晶にX線を照射すると、「ベリー位相」の効果を受けてX線が結晶中を大きく「横滑り」する結果が得られた(Kohmura+2010)。さらに同現象を予測した理論論文(Sawada+2006)によると、「横滑り」は光の角度成分に影響を及ぼさず、即ち入射光と出射光の向きがほぼ等しい事が予想された(図1)。新たな現象ゆえ未知の部分も多いが、これをX線の導波管として応用する事ができれば、原理的には短い距離で一気にX線を横滑りさせ、かつ浅い角度を保ちながらX線を重ねる事が出来る可能性がある。そこで、天文学のニーズに全く異なる光科学のアプローチから迫るべく、まずは同現象の本質的な理解と、派生する可能性を模索するため萌芽的研究を開始した。



(Kohmura et al. 2010, PRL)

図1. 2010年に発見された「横滑り現象」の概要(Kohmura+2010)。ブラッグ角で入射したX線が歪んだ単結晶の「ベリー位相」効果で大きく横滑りして結晶の縁から出射された。

### 2. 研究の目的

本研究では三つの目的を定めた。まずひとつは、(1)既に発見された「横滑り現象」を確実に再現して、かつ同効果による出力信号を高いS/Nで検出できるシステムを構築すること。次に、(2)その出力を詳細に調べ、歪みの制御や材料など、測定条件を変更しつつ結果を比較する事で、現象の根本的な理解を深めること。最後に、(3)光学装置としての特性や限界性能を調査し、得られた全ての知見を総合して新たな物理の応用可能性を模索することである。本研究は萌芽的特性が強い内容のため、これら異なる難易度の目的に段階的に挑戦していく事で、最大限の成果を見据えながらリスクの低減にも努めた。

### 3. 研究の方法

まずは横滑り現象を確実に再現し、さらに出力と入力信号を完全に分離するため、多様な薄膜結晶サンプルを最適な条件で保持するための専用マウントを開発した(図2)。

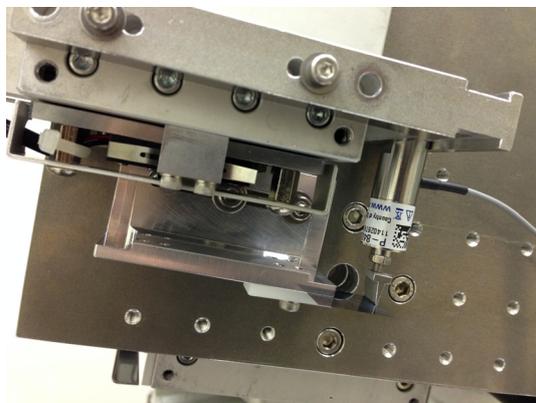


図2. 新たに開発した薄膜結晶マウント。サンプルの片隅を保持し、片隅をピエゾ素子で押して定量的に歪みを制御しながら手前の領域にX線を照射して高S/Nの信号を得る。

専用マウントには圧電素子を導入し、結晶サンプルの縁もしくはある点を物理的に押す事で、歪みを電氣的・定量的かつ動的に制御できるように開発した。圧電素子は高精度の物から高速加振用まで様々な種類を導入した。また、専用マウントによりサンプルと圧電素子は相対位置を固定したまま任意の位置や角度に移動する事が可能となり、これにより多様かつ再現性の高い実験が可能となった。同システムにより歪みの ON/OFF や量、照射条件などを変化させながら、最終的な出力を調査して特性を調べた (図3)。

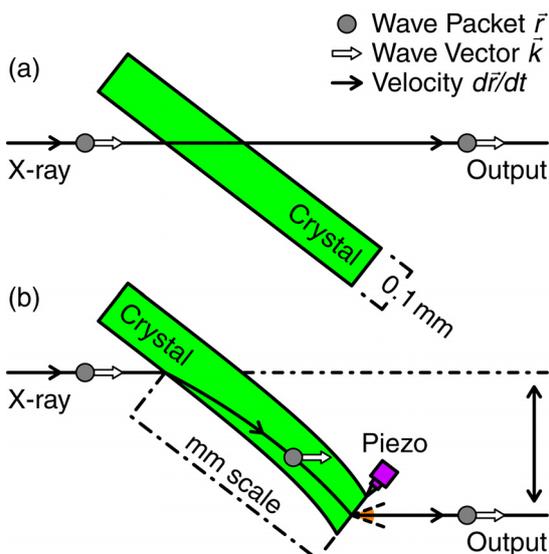


図3. 横滑り現象を応用した新たなX線制御の概要。 piezo素子で歪みの有無を制御する事で、X線の向きを変えず出射位置だけを移動して、光軸を平行移動する事ができる。

再現性の高い実験システムを構築した上で、大型放射光施設 SPring-8 の BL29XUL ビームラインにてX線照射実験を行った。まず参照光としてエネルギーが 15keV のX線を作り出し、サンプルとしてシリコンとダイヤモンド単結晶を用いて、サンプル中腹から縁にX線を横滑りさせた。下流にはブレードを置いて出力信号を切り出し、結晶の回転によるロッキングカーブ (角度成分) 測定や CCD 検出器による画像測定等を行った (図4)。

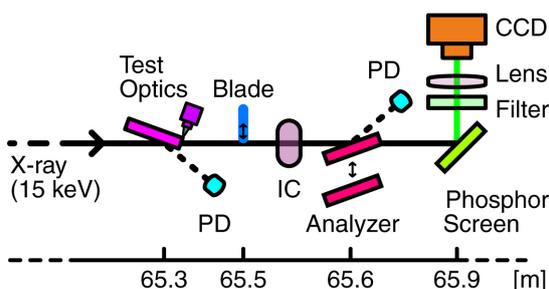


図4. SPring-8 で実施したX線照射実験の概要。横滑り現象の信号をブレード等で切り出し、結晶やフォトダイオード、CCD検出器などで出力の強度や角度成分を調べた。

#### 4. 研究成果

まず、目的(1)に挙げた通り、本研究で専用マウントを開発した事で、極めて高い S/N で「横滑り現象」の効果を受けた信号のみを切り分ける事に成功した。実際に結晶サンプルの中腹に入射したX線が縁まで伝搬して出射した様子が画像検出器により確認できた (図5)。これら入力と出力を比較する事で、伝搬中に何が起きているか、もしくは起きていないか検証する事が可能となった。

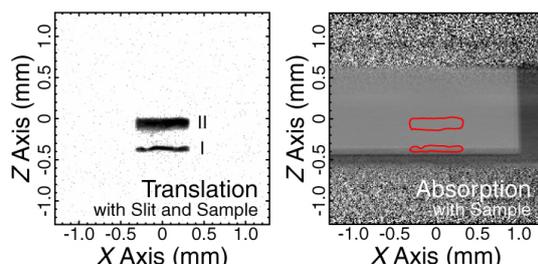


図5. (左)実際に横滑り現象で光軸を移動させたX線の検証写真、(右)X線吸収マップによる結晶と入射/出射光の位置関係。結晶中腹に入射した光(ビーム II)が結晶の縁に横滑りして出射(ビーム I)した事が確認できた。

次に目的(2)について、まずは横滑り現象による効果を受けて結晶の縁から出射した光の角度成分を調べた。結果、出射光の角度成分は入射光の角度成分と屈折のみで説明可能なレベルでほとんど一致している事が確認できた (図6)。これにより、同現象ではX線の角度成分を実際に維持しつつ、位置だけが大きく移動した事を初めて実証し、先行する理論論文における解釈とも矛盾がない事を突き止めた。また、同現象を応用すれば波面を乱さずにX線を任意の位置まで移動できる事がわかり、X線導波管としての役割を果たせる可能性がある事もわかった。

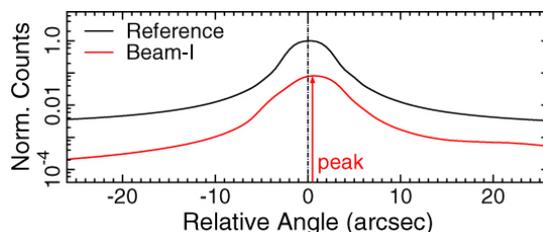


図6. 入射光(黒)と出射光(赤)のロッキングカーブ (角度成分) の比較。結晶を伝搬して出射された光の向きが、入射光の向きと秒角程度でほぼ一致している事がわかった。

続いて、X線照射位置とサンプルの縁までの距離を変えながら出力X線の強度を測定して、光学装置として使用する際にどこまで光軸を平行移動できるか調べた。結果、今回の一連の実験においては、シリコン単結晶を使用して入射X線の約3%を最大で0.4mmほど横滑りさせることに成功した (図7)。

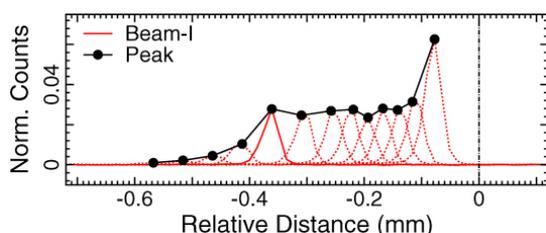


図7. SPring-8 で実施した横滑り距離と出力強度の関係。入射強度に対して約3%の光を0.4mmほど平行移動させる事ができた。

さらに目的(3)について、同現象の応用例としてX線スイッチが挙げられる。圧電素子で歪みを制御すれば光路の切り替えが可能で、また高周波で歪みを振動させる事でパルス状の出力を作り出す事もできた(図8)。

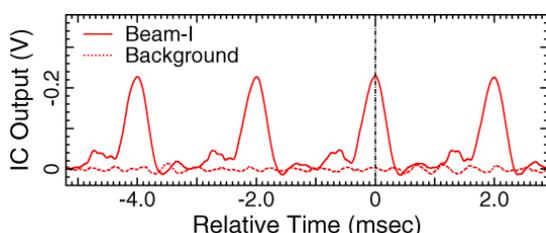


図8. 動的な歪み制御による出力X線の強度変化の観測例。高速に圧電素子を振動させる事で歪みに対応する出力強度を変化させて、簡易X線スイッチとして作動させた。

最後に、今後の参考のため本研究において発覚した問題点、および将来的な課題について議論したい。まず、X線の吸収率の違いから、ダイヤモンド単結晶を使用すればシリコン単結晶に比べ格段に吸収を抑えられ、光学素子としての効率も上がると期待していたが、予想に反してそれほど高い移動効率が得られなかった。これは、大局的には単結晶の純度が原因と予想される。シリコン単結晶は一般的に超高純度の物を手に入れる事が比較的容易で、そのため今回の様な結晶格子を利用した検証実験では理想的な結果となる事が多い。一方、本研究で必要な大型のダイヤモンド単結晶は製造が極めて難しく、入手も困難でシリコンに比べると一般的に高価で格子欠陥も多く含まれる場合が多い。結果的に、今回は可能な限り良質ないくつかのダイヤモンド単結晶を使用したものの、直接的な性能向上には繋がらなかった。近年の技術向上に伴い、将来的には高純度かつ良質なダイヤモンド単結晶がより安価に入手可能になると推測されるため、それらを手に入れる事が出来れば、さらなる飛躍的な移動効率の向上、および同分野の発展も期待される。

また干渉について、本研究は当初の最終目的として干渉光学系のための光学素子の開発を目指していたが、横滑り現象で影響を受けた光に対して干渉縞を作り出す事はできたものの、今回は光源の情報を引き出すまで

には至らなかった。これは、先に述べた通りダイヤモンド単結晶による伝搬の効率が予想に反して上がらず、結果として高いS/Nで長距離の理想的な横滑りを実現できなかったため、干渉縞を作成した際にノイズとの切り分けが不可能であった点が大きな理由と考えられる。これもまた将来的には超高純度かつ大型のダイヤモンド単結晶を使用する事で、さらなる改善が期待される。

以上総括として、本研究では新しい物性理論を実証して、世界初となるX線の光軸を平行移動できるX線導波管の基礎を築き、将来のX線制御に対する応用の可能性を見出した。一方、当初期待していたダイヤモンド単結晶による高効率化までには至らず、干渉計測による光源情報の測定にはさらなる改善が必要な事もわかった。これら結果の一部を論文として投稿し、新しいX線制御のアイデアとして学会・研究会などで発表した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Takei, D., Kohmura, Y., Ishikawa, T., and Sawada, K., Unidirectional X-ray Output from a Crystal Waveguide affected by Berry's Phase, submitted.

[学会発表] (計3件)

- ① 武井大、「X線導波管による干渉望遠鏡の検討」、X線望遠鏡研究会、2015年1月16日、名古屋大学・野依記念学術交流館(愛知県名古屋市)
- ② 武井大、「横滑り現象を応用したX線制御手法の開発」、日本放射光学会年会、2015年1月11日、立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県草津市)
- ③ 武井大、「湾曲した単結晶によるX線光学系の開発」、コヒーレントX線が拓く構造可視化の新しい世界、2014年8月22日、SPring-8(兵庫県佐用郡)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武井 大 (TAKEI, Dai)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・基礎科学特別研究員  
研究者番号: 10709372

### (2) 研究分担者

香村 芳樹 (KOHMURA, Yoshiki)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・ユニットリーダー  
研究者番号: 30270599