



展 TENBO 望

X線の蜃気楼 —その発見と応用—*



タチアナ ピクズ アナトリー ファエノフ**

Tatiana Pikuz

Anatoly Faenov

((独)日本原子力研究開発機構)

1 はじめに

X線は可視光よりも波長が短いという違いはあるが、同じ電磁波の一種である。このことは可視光で起こり得る全ての現象がX線領域でも起こり得ることを示している。しかしX線の発見から100年が経ち、その間にX線の科学は大きな進歩を見せているにもかかわらず¹⁾、可視光の屈折が引き起こす不思議な、そして驚くべき現象である蜃気楼²⁾をX線の領域で観測したという報告はまだない。蜃気楼は、地上からの高さの違いによって可視光に対する大気の屈折率が大きく変化することで引き起こされるが、通常物質ではX線領域の屈折率に大きな変化は期待できないので、X線領域の蜃気

楼は非常に起こりにくいと予想される。X線を発見したヴィルヘルム=レントゲンも、X線を発見してすぐの頃に、この線源の特殊性は、全ての物質に吸収され、屈折率はどの物質に対しても1に近い、と記している。後者の特徴は、通常物質を用いる限りX線の蜃気楼の可能性はほとんどないことを示している。これに対して、近年の光学レーザー技術の発展により我々は新しいユニークな物質(媒質)を手にすることができるようになった。それは、X線を実効的に屈折させ、X線領域のレーザー(プラズマX線レーザー)を発生³⁾できるレーザー生成プラズマである。レーザー生成プラズマを用いたプラズマX線レーザーは、1984年のレーザー発振の原理実証以来、実験室規模の小型軟X線レーザーの開発に向けて研究が進められ⁴⁾、現在、高温の電離しつつあるプラズマ中において、プラズマ中イオンの励起状態間に反転分布を生成する方法(過渡利得電子衝突励起方式)により小型で高い空間コヒーレンス(X

* 翻訳は(独)日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 河内哲哉氏による。

** ロシア科学アカデミー合同高温研究所からの客員研究員。

線の波の位相が揃っている状態)を持つX線光源が実現している⁵⁾。今回、日本原子力研究開発機構関西光科学研究所(以下、原子力機構関西研)、光産業創成大学院大学、モスクワ州立大学、ロシア科学アカデミーの合同高温研究所の研究者等による国際チームは、このプラズマX線レーザーを用いることで、X線領域の特異な蜃気楼現象を発見した⁷⁾。以下に、この実験結果と理論解析の詳細、そして得られた現象の科学技術における応用について述べる。

2 X線の蜃気楼の観測

X線領域の蜃気楼は、プラズマX線レーザーの出力ビームの波面の空間特性を調べる実験中に発見された。このプラズマX線レーザーは、原子力機構関西研の超短パルス赤外線レーザー光を銀(Ag)の薄膜に線集光(集光長さ: 6 mm)するとき生じる高温高密度のプラズマから得られる。レーザーの波長は13.9 nmで、プラズマ中に生成されるAg¹⁹⁺イオンの4p-4d遷移線がプラズマ中を伝搬する際に選択的に増幅されることで発生する。図1(a)に、プラズマX線レーザーを発振させる際の配置図を示

す。銀薄膜は206 mmの間隔で2つ配置されており、前段(図中左側)の銀薄膜から生成されるプラズマがX線レーザーの発振器、後段(図中右側)がX線の増幅器の役目を果たし、二段階でX線が増幅される。こうして得られるプラズマX線レーザーは、波長幅($\lambda/\Delta\lambda$)が4桁以上、パルス時間幅が7 ps (1 ps = 10⁻¹² 秒)、繰り返し周期は0.1 Hzで、出力エネルギーはパルス当たり300 nJになる。

この実験において、プラズマX線レーザーのビーム形状を光源から3,314 mmの位置で観測したところ、図1(b)のような同軸のリング状の干涉縞(暗い部分と明るい部分が連続の模様)が、ほぼビーム全体にわたって得られた。また、このリング状の干涉縞が生じるためには、X線の発振器として働くプラズマの生成とX線の増幅器のプラズマ生成が10 ps以内で同期することと、2つの銀薄膜が0.6度以下の精度で平行であることが必要であった。

当初、筆者らにとって、このような干涉縞の生成は全く予想外であった。この結果を説明する物理過程が見当たらなかったからである。今回の実験ではX線の発振器と増幅器という2つのX線光源があるが、各々の光源から発生

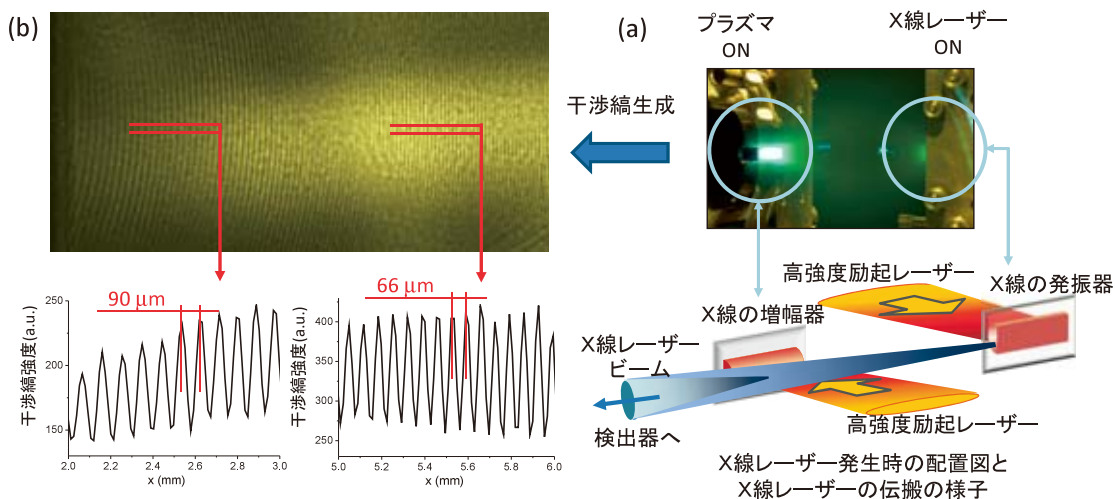


図1 (a) プラズマX線レーザー(XRL)が発生する際の可視光領域の発光とXRLの2段階発生のためのレイアウト、(b) XRLのビームパターンの中に観測された干涉縞

する X 線の位相には相関がないために干渉縞はできないはずである。一方で光学の干渉原理によれば、今回のようなリング状の干渉縞が得られるためには、ある軸上の異なる場所に位相に明らかな相関がある 2 つの光源があり、そこから発せられる光を同軸上から観測する必要がある (図 2 (a))。

筆者らは状況をより深く理解するために、プラズマ X 線レーザーの発振器と増幅器を ON-OFF したときに干渉縞が生じるかどうかをチェックした。その結果、どちらか一方がなければ干渉縞は生じない、つまり、X 線の発振器として働くプラズマと増幅器として働くプラズマの両方あるときだけこの現象が起きることが分かった。

干渉縞を作る 2 つの X 線光源のうち、1 つ目の光源は図 1 (a) のプラズマ X 線レーザーの発振器の出口位置と考えるのはごく自然である。それでは 2 つ目の光源はどこにあるのか？ 筆者らは実験で得られた干渉縞間隔を計算による推定と比較することで、2 つの光源の距離が理論上 203 ± 2 mm になることを見いだした。発振器と増幅器の中心間距離は 206 mm なので、2 つ目の光源は X 線の増幅器として働くプラズマの中心付近に存在することになる。ただし、本来、このプラズマからの X 線は 1 つ目の光源からの X 線とは位相に相関がないので干渉縞を作れないはずである。したがって、この 2 つ目の光源は、1 つ目の光源と位相に相関を持っているが、あたかも X 線の増幅器の中心付近に位置するかのように見える光源の虚像になる。

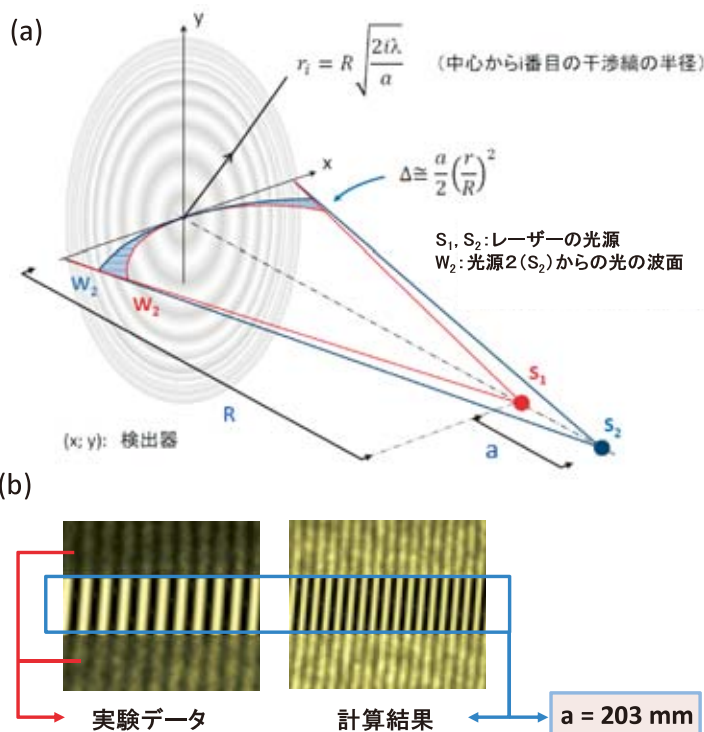


図 2 (a) 2 つの異なる位置にある位相に相関がある光源が作る同軸のリング状の干渉縞, (b) 実験で得られた干渉縞と理論的に再現された干渉縞

3 レーザー生成プラズマにおける X 線の蜃気楼発生の理論と実験の比較

前章で述べた通り、今回の実験結果は、1 つ目の光源と位相の相関を持った光源の虚像が X 線の増幅器の中心付近に出現していることを示している。このような虚像の出現は、密度分布が平坦で均一な媒質中の非線形な光の吸収・放射過程では説明できない。実際に、誘導放出過程により種光がトリガーとなって新たに光が発生する際には、その発生する光の波面はもともとの種光の波面と同一になる。その結果、もともとの光が強くなることがあっても、進む向きが異なる光 (言い換えると異なる場所から発生しているように見える光) は生成できない。しかしながら、レーザー生成プラズマには非常に高密度の領域を狭い領域に作り出すという特徴

がある。そのようなプラズマの性質は光学的な不均一さを持つことであり、大気中の温度の不均一さが引き起こす蜃気楼のような現象をX線領域で引き起こす可能性を持つ。

理論的な解析を行う上で、筆者らはまず、データ解析の現場で頻繁に使われているマクスウェル=ブロッホ方程式の適用を試みたが、現象の説明には至らなかった。その代わりに、X線の蜃気楼出現に影響を与える原因として、屈折率（又はプラズマ密度）の空間分布とプラズマの持つX線の増幅効果が重要な役割を果たしていることが分かった。筆者らはこれらの効果を組み込んだ新しい理論的なアプローチを行い、X線の発振器を光源とするX線レーザーが光学的に不均一かつX線の増幅器として働くプラズマ中を伝搬して行く様子（図3(a)）を記述する波動方程式を導出した。

この手法に基づいた解析を行った結果、以下の4つの条件が満たされれば、X線の蜃気楼がコヒーレントな光源の虚像として観察できることが分かった。(1) 電子密度分布に局所的なピークがあり、(2) そのピークに対応したX線の増幅利得分布のピークがある、(3) 利得領域の大きさは電子密度分布の局所的なピークの大きさと等しいかそれよりも小さい、(4) X線の伝搬方向にはプラズマは十分に均一である。

このような条件は、実は、短パルスレーザーを固体ターゲットに照射した際に生じるプラズマにおいて、非常に短い時間ではあるが実現可能である。この短い時間のみ実現するという部分は、今回の実験でX線レーザーの発振器と増幅器を生成するタイミングのずれが10 ps以上になると蜃気楼が消失することと符合する。さらに、電子密度やX線の増幅利得係数の空間分布に局所的なピークがあるときにのみX線光源の虚像が観測されることは、レーザー生成プラズマの持つ重要な可能性を示している。それはレーザー生成プラズマがX線のレンズの役割を果たすことで（図3(a)参照）、X線の波面を思い通りの向きへ変えることができる点である。今回のプラズマの中を通過するX線レーザーから見ると、プラズマの密度分布は、ちょうど2次元の放物面のような分布をしている。このようなプラズマは、通常の光学素子と同様な光学的な性質を持ち、ある種のレンズとして働く。プラズマの場合には密度が高ければ高いほど屈折率が低くなるため、このレンズはちょうど、収差のない凹レンズとして働く。X線の発振器から発生するプラズマX線レーザーの一部がこのような光学系を通過すると、X線レーザーのビーム拡がり角が大きくなるように変化する。この変化は、あたかも点光

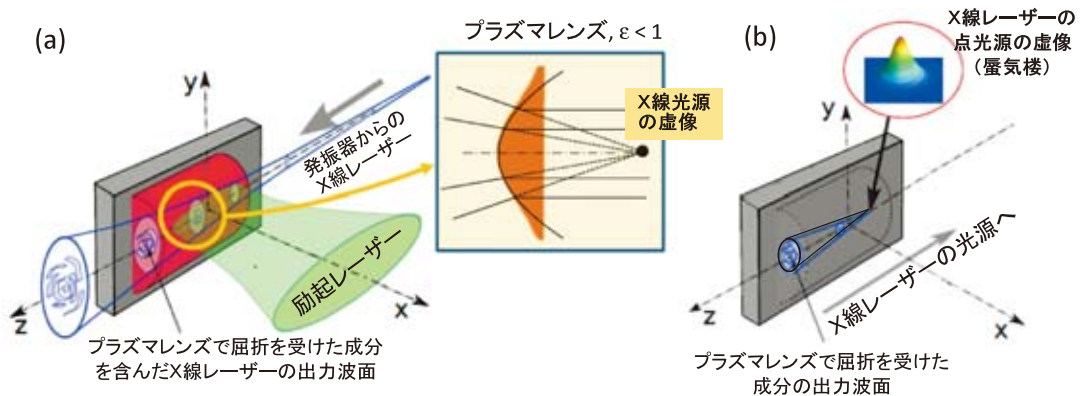


図3 X線の蜃気楼の理論 (a) X線の発振器から発生するプラズマX線レーザービームがX線増幅器として働くプラズマ中のプラズマレンズの効果で拡がっていく様子、(b) 拡がるX線ビームから仮想的な光源（虚像）位置が推定できる。上の図は、計算により再現された光源の虚像の姿（光源の蜃気楼）

源が近くにあり、そこから光が拡がりながら放射されるように見える (図 3 (b))。同時に、この凹レンズとして働く部分は X 線の増幅利得を持っているため、ここを通過する X 線レーザーは強く増幅する。その結果、レンズを通過した部分の上流側に、図 3 (b) に示したような光源の虚像 (蜃気楼) が生成され、そこを光源として拡がりながら進む X 線と、プラズマの凹レンズの効果をあまり受けない周辺部分とが重なる。これら 2 つの X 線は、もともと X 線の発振器を起点とする X 線レーザーの一部なので位相に相関がある。その結果、重なった部分にリング状の干渉縞が形成される。

4 おわりに

今回の実験結果は、物理現象の面白さという観点からは、X 線領域の蜃気楼の初めての観測結果であり、レーザー生成プラズマの中での X 線の屈折や増幅についての観点からは新しい知見を与えるものである。また、技術的な観点からは、X 線によるプラズマ診断法につながる技術と言える。一方で、X 線の蜃気楼形成を記述するために、今回新たに導入した理論的なアプローチは、不均一な媒質中を伝搬する X 線を取り扱う新しい手法を提供する。この手法を用いることで、X 線の増幅が起きる際の X 線の屈折と回折を両方取り扱うことが可能になるなど、従来の光線追跡手法よりも高い精度での X 線の伝搬の予測ができるようになる。また、今回の蜃気楼の観測は、結像系を用いたイメージング観測ではなく干渉縞の形成を通じて光源の虚像の形成を知るもので、干渉縞の観察が有効なプラズマの診断法になる。実際に今回の実験においても干渉縞のもたらす情報から、電子密度の空間情報や利得係数の空間情報の推定を行

うことができた。

最後に、X 線の蜃気楼現象は、様々な X 線の科学技術の分野で利用できる可能性を秘めている。例えば、蜃気楼形成の原因となったプラズマの密度分布による X 線レンズを積極的に制御することでプラズマを用いた補償光学素子技術が実現すれば、X 線干渉計やトモグラフィー機器の高性能化に貢献できるかもしれない。また、今回の X 線の蜃気楼観測を土台にして、更に研究を続けていけば、X 線補償光学素子による X 線ホログラフィーの制御も可能になるかもしれない。筆者らもこの方向で研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Attwood, D.T., *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2007)
- 2) Knowlton, A.A., *Science*, **50**, 328 (1919)
- 3) Elton, R.C., *X-ray Lasers*, Academic, New York (1990)
- 4) Suckewer, S. and Jaegle, P., *Laser Phys. Lett.*, **6**, 411 (2009)
- 5) Kawachi, T., *et al.*, *Phys. Rev. A*, **66**, 033815 (2002)
- 6) Nishikino, M., *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **80**, 116102 (2009)
- 7) Magnitiskiy, S., Nagorskij, N., Faenov, A., Pikuz, T., Tanaka, M., Ishino, M., Nishikino, M., Fukuda, Y., Kando, M., Kawachi, T., and Kato, Y., *Nature Communication*, **4**, 1936, doi: 10.1038/ncomms2923 (2013)
- 8) Nishikino, M., Hasegawa, N., Kawachi, T., Yamatani, H., Sukegawa, K., and Nagashima, K., *Applied Optics*, **47**, 1129 (2008)
- 9) Born, M. and Wolf, E., *Principles of optics*, Pergamon Press, Oxford (1965)
- 10) Al'miev, I.R., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 123902 (2007)
- 11) Dorofeenko, A.V., *et al.*, *Phys.-Usp.*, **55**, 1080-1097 (2012)