

光技術ユニット 太田 紘志

UVSOR BL1U真空紫外光 実験ビームラインの ブランチ化について

おおた ひろし/分子研のある岡崎市出身。博士後期課程修了後、民間企業を経て、学生時代から縁のあったUVSOR施設の加速器グループの技術職員として着任しました。現在は、学生時代の経験を基にビームラインの設計・開発と電子シンクロトロン機の運転・維持を行っています。趣味はネコ吸いとトレイルランニングに加え、日本各地の温泉を巡っております。

紫外線という単語は、日焼けや殺菌という言葉と共によく耳にしますが、真空紫外光（しんくうしがいこう）という言葉をご存じでしょうか？真空紫外光はVUV (Vacuum Ultraviolet) と表記され、波長 λ が200 nmから10 nm程度の光のことです（図1）。この波長域になると、物質に非常に吸収されやすく、空気を構成する分子でさえも真空紫外光を猛烈に吸収し始めます。したがって、空気を排除した真空容器の中になければ利用が難しいため、真空紫外光という名前が付けられています。

一方で、物質に吸収されやすいという性質は、真空紫外光と物質との相互作用が大きいことを意味します。真空紫外光を物質に照射することにより、物質を構成する原子や分子内の電子をたたき出すことが出来ます。この現象は、光電効果と呼ばれていますが、その際飛び出してくる電子のスピードを精密に計測すると、物質内の電子がどのような状態に在ったのかを窺い知ることができるのです。このような実験方法は、光電子分光法と呼ばれ、その理論的解釈により、アインシュタインがノーベル物理学賞を受賞しています。光電子分光法は、材料開発研究における極めて強力な分析手段として広く利用されており、非常に多くの研究成果が得られています。最近でも、2016年のノーベル物理学賞の対象となったトポロジカル物質相とも関連が強く、既存の

物質では見られなかった新奇な機能の発現機構も、光電子分光法により得られた知見により確認することが可能となっています。

このように現在の科学技術を支える真空紫外光ですが、この波長域をカバーする強力な連続光を発生させることは困難です。私の所属するUVSOR施設では、シンクロトロンと呼ばれる加速器を利用し、電子を光速の99.9%以上の速度で周回させることによって、赤外線～真空紫外光～X線までの広い波長範囲を含む光、シンクロトロン光を発生させています。シンクロトロン光は、そのまま実験に使われるのではなく、鏡を利用して光を集めて、必要な波長の光だけを選別して実験試料に照射します。この光の加工と輸送を行うための装置は、実験を行う観測装置と区別して、我々の業界ではビームライン (BL) と呼んでいます。

私が担当するビームライン1U（以後、BL1U）も真空紫外光を利用することができるよう設計されており、様々な実験に利用されていますが、使い勝手などを改善するための改装計画が2020年度の初めに立ち上がりました。利用者からの主な要求としては、観測装置の移設と、実験別に光を振り分けて利用するブランチ化（一つの光源を基に複数に分岐）です。二種類の前置集光鏡を一つの真空容器（第0鏡室、図2参照）に組み込むことで、回折格子分光器を通した単

色光を利用する分光ブランチと分光器を利用しない集光ブランチの整備を行いました。図2(a)に改装前後のBL1Uの配置図を示します。改装前（図2(a)下）は、実験条件ごとに分光器室と第二鏡の移動・設置が必要でしたが、BL全体の再設計を行うことで解決を図りました（図2(a)上）。このブランチ化は、私にとって非常に挑戦的な技術課題であり、新たに検討・設計すべき事柄が多数ありました。

ブランチ化の1つ目の課題は、光の振り分け機構です。改装後の配置を見ていただくと分かるように、空間的な制約から、二つのブランチを大きくずらした場所に設置する必要がありました。通常、光の振り分けは、振り分ける鏡の反射角度の調整によって行われますが、BL1Uにおいてこの方式を採用するには、2つの問題がありました。第一に、2つのブランチに振り分ける際の反射角度の違いが大きすぎるため、一枚の鏡で振り分けられるような設計が不可能であること、第二に、鏡の位置調整機構の製作費用が高額となることでした。そこで、これらを解決するために、図2(b)のように第0鏡室内に反射角度の異なる二枚の鏡を設置する方法を採用しました。これにより、二枚の鏡を切り替えることで光の振り分けを可能にし、実験目的に合致した光の選択が可能になりました。この機構を選択したことにより、1) 振り分け鏡

室とその位置微調整機構が不要となった、2) 2枚の鏡を同じ架台に統合したことにより1台の位置微調整機構で済む、3) 同じ光軸上に2つの鏡の中心を一致させたのでブランチの切り替えが簡素にできる、等々多くの利点があります。この光の振り分け方式をタンデムミラー方式と呼んでいますが、基本的には他の施設を含め、採用例は無いと思います。

ブランチ化2つ目の課題は、鏡の新規設計です。真空紫外光を有効に利用するためには、しっかりと集光しなければなりません。物質に吸収されやすいという特性から、可視光のようなレンズを用いた集光はできません。真空紫外光の集光には、点光源からの光を一点に集める機能を持たせた特殊な凹面を持つ反射鏡を用います。そのような機能を有する凹面形状の一つにトロイダル面と呼ばれるものがあります。身近なトロイダル面の例としては、自転車のタイヤ内面の形状が上げられます。トロイダル面鏡は、直交する二軸（水平方向と鉛直方向）の曲率が異なる非球面鏡であり、それぞれの曲率は、光の入射角度、光源から鏡までの距離、鏡から集光点までの距離をパラメータとして決定されます。

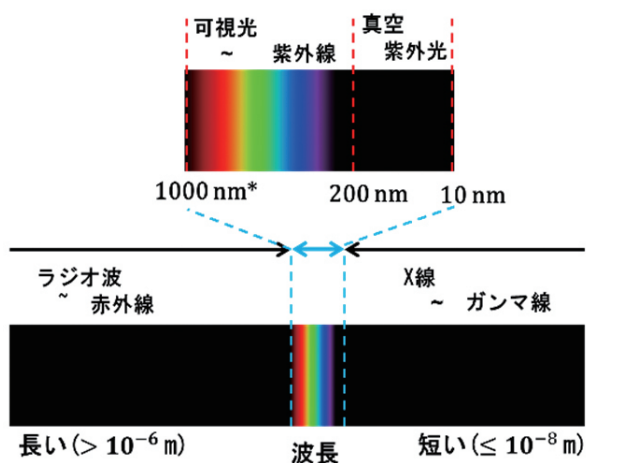
真空紫外光では、鏡に対する入射角

度によって鏡面の反射率が大きく変化するため、入射角ごとに反射率のシミュレーションを行う必要があります。その結果、集光ブランチの反射鏡には、改装前の比較的入射角度の浅い可干涉光鏡をそのまま利用できることが分かりました。そのため、今回は、分光ブランチ用の集光鏡のみを設計製作することになりました。真空紫外光より短い波長域においては、シンクロトロン光の入射角と反射光がなす角度 θ_f (図2(a)上) が 180° に近い角度でしか高い反射率が得られません。分光ブランチのなす角度 θ_b (図2(a)上) のように小さい場合には、反射率のために利用できる波長域に大きな制限が掛かります。今回の場合、使用するユーザーへの事前の聞き取り調査により、 $\lambda=40$ nmまでの光が使用できれば十分との回答をいただいていたので、反射率のシミュレーションの結果から、角度 $\theta_b=68^\circ$ を選択しました。これにより、 $\lambda=40$ nmより短波長の真空紫外光の利用は絶望的となりますが、この選択のメリットとして、分光器では選別できない高次回折光と呼ばれる不要な光(欲しい波長の分数倍の短い波長の光)を抑制するフィルターとして働くことが期待されます。実験データに含まれる高

次回折光による偽物の信号が低減されるので、誤ったデータ解釈に繋がるリスクが減ることが期待されます。

以上のような技術課題について、UVSOR職員や外部のユーザーさんの助けやアドバイスをいただいたお陰で、特に大きなトラブルも無くBL1Uブランチ化を実現することができました。現在、世界初の実験手法の開発などに使われ、徐々にデータがスタートしております。今回のBL1Uの改装では、設計段階で妥協したことや運用を始めてから発生した問題などもありましたが、ビームラインの真空容器や前置集光鏡の設計・製作に携わり、それらを実際に使用するという非常に貴重な経験を積むことができました。この経験を糧とし、今後の業務において、難易度の高い案件に出会った際には、より良い仕事に繋がりたいと思います。

最後になりましたが、前置集光鏡の設計の際にご助言を頂いた佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターの金安副主任研究員、広島大学の高口准教授、UVSOR職員の皆様、第一鏡室を製作いただいた真空光学株式会社様、分光光集光鏡を製作いただいたシグマ光機株式会社様に、この場を借りてお礼申し上げます。



*: nm = 10^{-9} m

