

光のエネルギーを切り出す (真空紫外・軟 X 線編)

雨宮健太 東京大学・大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail: amemiya@chem.s.u-tokyo.ac.jp

木村真一 自然科学研究機構・分子科学研究所 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38
E-mail: kimura@ims.ac.jp

1. はじめに

前回の「X 線編」は数 keV 以上の X 線の分光の方法についてのお話でしたが、今回はより低エネルギー領域の「真空紫外 (VUV)・軟 X 線 (SX) 編」です。その中でも特に、「光のエネルギーを切り出す」のに主に反射型の回折格子を用いる、10 eV~2 keV 程度 (波長でいうと 120 nm~0.6 nm 程度) を想定しています。10 eV から 2 keV という 3 桁にもわたる極めて広いエネルギー範囲になりますが、分光器のタイプの違いこそあれ、すべて反射型の回折格子でカバーできます。もちろん、VUV・SX 領域でも、第 4 回で紹介された多層膜 (現段階ではあまり高分解能は期待できないようですが) や、第 5 回で紹介された結晶分光器を用いることはあります。ただし結晶分光器の場合、結晶の格子面間隔の 2 倍よりも長い波長の光は分光できませんので、特に低エネルギー (長波長) 側はカバーできません。逆に、VUV・SX よりも低いエネルギー領域では、透過型の回折格子やフーリエ変換干渉計も使われています。これはビームスプリッターと呼ばれる半透過膜で光束を 2 つに分けることでそれらの干渉縞を作り出し、それをフーリエ変換することで分光スペクトルを得るものです。この分光方法や透過型回折格子とともに、光が光学素子の中を通り抜けることを利用して分光しています。それは光の吸収が弱い (吸収断面積が小さい) ことに関係しています。しかしながら、VUV・SX 領域では光はほとんど吸収されてしまい、薄い基板もしくは完全に抜けた基板を用いた透過型回折格子やゾーンプレート (第 8 回参照) などの特殊な場合以外には透過型の光学素子は使われていません。これは VUV (真空紫外) 光という呼び方の由来と関係があります。それは、大気中では空気に吸収されてしまい、取り出すことができないためです。ましてや、大気より密度の高い固体できている光学素子は、ほとんど透過できません。以上のような理由から、今回は反射型の回折格子を用いた光学系に絞ってお話したいと思います。

反射型の光学系自体は X 線領域でも用いられています。X 線領域では光学素子の屈折率が 1 よりわずかに小さい

ために、反射鏡表面にすれすれに入射することによって全反射が起こります。その場合、光の強度をほとんど損わずに光を整形することができます。それに対して、VUV・SX 領域での屈折率は、内殻の吸収によって 1 より大きい場合が多いために、どのような入射角にしても反射鏡である程度吸収され、光の強度が弱くなります。鏡の反射率は反射面の材質・光の波長・反射角・偏光方向に依存しますので、反射率の違いを利用することで取り出す光をある程度選別することができます。最終的には、回折格子を用いることで必要な光を切り出し、それを適当な反射鏡で試料位置に集光して実験に利用します。

X 線の分光には結晶を使うために、標準的な分光器の分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$) は約 10^4 で、「分解能を犠牲にして光の強度 (フラックス) を稼ぐ」ということはほとんどできません。それに対して、VUV・SX 領域では回折格子を用いるために、後述のように「好きな」分解能とそれに応じたフラックスを選ぶことができます。「好きな」といっても、光学素子の加工精度によるエラーなどがありますので、いくらかでも高分解能にできるわけではありません。現在のところ、分解能の上限は VUV 領域で 10^5 、SX 領域で 10^4 程度です。分解能を上げることは、試料に導く光のフラックスを下げることにもなります。よって、実験のスタイルによって、「フラックスは低くても極限の分解能がほしい」とか、「分解能は高くなくてもよいがフラックスがほしい」とか、「ある程度の分解能もフラックスもほしい」といった違いが出てきます。つまり、実験スタイルに合わせた分光器の設計が必要になります。

本稿では、VUV・SX で用いられる回折格子分光器の仕組みと、必要な分解能やフラックス、純度を得るための技術について説明します。また、放射光を分光器に合うように整形する前置集光系、光のエネルギーを切り出す分光器、分光された光を試料に導く後置集光系について実際のビームラインで用いられている例を示します。

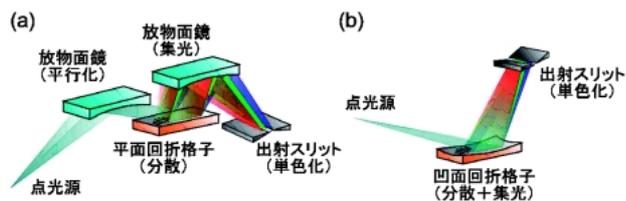


Fig. 1 Schematic layout of basic monochromators consisting of two parabolic mirrors and a plane grating (a) and a concave grating (b).

2. 回折格子を使ってどのようにエネルギーを切り出すか

2.1 基本的な分光器

回折格子の一番大切な役割は光の波長を角度に変換する（分散させる）ことです。これを利用して、白色光を回折格子に照射し、波長に応じて様々な方向に出てくる光のうちに必要なものだけを切り出せば分光ができるわけです（第4回参照）。この時、回折格子の最も基本的な（わかりやすい）使い方は「平面波」を入射するものでしょう。例えば第4回では多重ピンホールによる光の回折の様子が示されましたが、入射光は平面波、つまり平行光でした。ところが、大抵の光源からの光は球面波、つまり発散光ですので、まずこれを平行化するのが自然な流れといえるでしょう。これを図にしたのが Fig. 1(a) です。簡単のため、光源は点としましょう。発散光を平行光にする光学素子、それは放物面鏡です。平行化された白色光を回折格子に照射すると、波長に応じて様々な方向に平行光が出てきます。これらのうち、特定の角度に出てくるものだけを取り出せばよいのですが、平行光には幅があるため互いに重なりあっていて、十分遠くに行かないとうまく分離できません。そこで、今度は放物面鏡を逆に使って回折格子からの平行光を収束光にしてみましょう。すると光が収束される先（焦点）では、異なる波長の光は違う場所に収束され、ここに「出射スリット」を置くことで容易に光の波長を選別することができます。しかも、スリットの開口を大きくすれば、いくらでも分解能を落としてフラックスを稼ぐことができます。これが回折格子を使った、最も「基本に忠実な」分光器であると言えるでしょう。取り出す波長を変えたいときには、もちろんスリットの位置を動かしてもいいのですが、多くの場合、回折格子を回転させて回折の条件を変え、スリットの開口の位置に欲しい波長の光がくるようにします。

ちなみに、点光源からの発散光を完全な平行光にするには回転放物面が必要ですが、回折格子は一方にしか分散機能をもたませんので、溝と平行な方向に関しては平行光である必要はありません。同様に収束光にするときも点に集光する必要はなく、図のように線に集光するだけで分光は行えます。

もう一つの極端な例として、回折格子だけを用いた「最も単純な」分光器を Fig. 1(b) に示します。もちろん、普通の平面回折格子に発散光を当てると、出てくる光も発散し続けます。すると異なる波長の光が大きく重なり合ってしまう、波長の分別がうまくできません。そこで、回折格子を凹面にして分散機能とともに収束機能も持たせてしまおうというのがこの分光器の考え方です。でも、発散光を凹面回折格子に当てるとどうなるのでしょうか？もちろん、点光源からの発散光を全ての波長において完全に点または線に集光することはできません。点を点に集光するものは楕円鏡ですが、回折格子の場合には溝による回折の効果がありますので、たとえ楕円回折格子を使っても完全な集光はできません。これは高分解能を目指す意味では厄介な問題ですが、実は「完全」であることは必ずしも重要ではありません。後述のように分解能は様々な要素で決まりますので、条件によっては集光の不完全さは無視できることもあるのです。またこれも後述しますが、「光学素子の数が少ない」というのは大きな利点です。

2.2 高分解能を実現するための条件と問題点

ここで、どうしたら高分解能が得られるのかを考えてみましょう。Fig. 1 からわかるように、分光において重要な要素は、「分散」と「集光」です。つまり、違う波長の光をなるべく離れた位置にもっていき（「分散」させ）、しかもそれぞれの波長の光をなるべく小さく「集光」することで高分解能が得られます。逆に言えば、いくら出射スリットを絞っても分解能は「分散」と「集光」で決まる限界までしか到達しません。

まず、分散の大きさを式にしてみましょう。Fig. 2 のように、入射角、出射（回折）角を α, β とおき、光源から回折格子中心の距離を r 、そこから出射スリットまでの距離を r' とおきます。ここで、 α, β は回折格子の法線からの角度であることに注意してください。これは単に定義の問題ですが、慣習として X 線領域では逆に表面からの角度を使うことが多いようです。また、角度には符号があることも忘れないで下さい。つまり図のような配置では $\alpha > 0, \beta < 0$ となります。さて、Fig. 2 では平行光入射ではない上に凹面回折格子なので回折条件は難しくなりそうですが、どんな時でも回折格子中心を通る光については簡単で、

$$\sin \alpha + \sin \beta = nm\lambda \quad (1)$$

となります。ここで、 n は刻線密度（単位長さあたりの溝の本数）、 m は回折次数（隣りあった溝で回折される光の光路差が波長の m 倍になる）、 λ はその方向に回折される光の波長です。この式は第4, 5回で見たブラッグ条件と似ていますが、一番大きな違いはブラッグ条件では入射角と出射角が等しいのに、(1)式では等しくない、つまり $|\alpha| \neq |\beta|$ であることでしょう。もし $|\alpha| = |\beta|$ で(1)式を

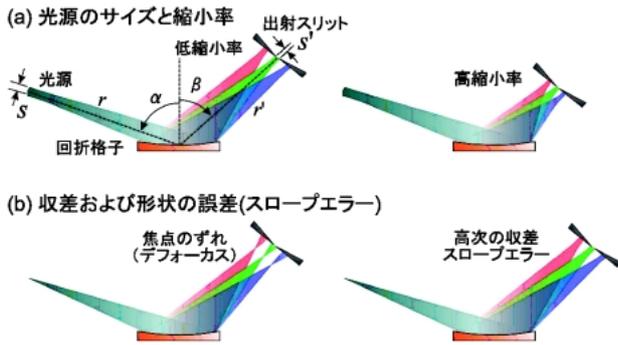


Fig. 2 Effects of the source size and demagnification (a), aberrations and slope error (b) on the focus property.

満たそうとすると、 $m=0$ とするしかありませんが、こうすると全ての λ で(1)式が成り立ってしまいます。これは、入射角と出射角が等しい場合には全ての波長の光が反射されることを意味します。ちなみにこの条件で得られる白色光を0次光と呼び、分光器の調整等に使われることもあります。さて、分散は α を一定としたときの β と λ の関係で決まりますので、(1)式を微分することで、

$$\cos \beta d\beta = n m d\lambda, \quad dz/d\lambda = r' d\beta/d\lambda = r' n m / \cos \beta \quad (2)$$

が得られます。ここで、 z は出射スリットにおける光の分散方向（刃と垂直方向）の位置であり、 $dz/d\lambda$ は異なる波長の光がどれだけ違う位置にくるかを意味します。基本的にはこれが大きいほど波長の分離がしやすいわけですが、実際には以下に述べる「集光」との相対的な関係が重要になります。

集光された光のサイズは何で決まるのでしょうか。一つ目の要素は「光源のサイズ」です。今までは点光源を考えてきましたが、実際の光源はあるサイズをもっています。その結果、どんな光学系を使っても出射スリット位置における光は有限のサイズをもちます。この光源サイズによる影響を Fig. 2(a) に示します。このような単純な分光器の場合には集光点における光源サイズの下限 s' は以下のようにかけます。

$$s' = (r'/r) (\cos \alpha / \cos \beta) s \quad (3)$$

つまり r' が r に比べて小さいほど小さく集光できることとなります（もちろんその分、回折格子の曲がり具合をきつくする必要があります）。ちなみに s' が s に比べてどれだけ小さくなるかを「縮小率」と呼びます。さてここで、いくつか疑問が浮かんできます。例えば、 $\cos \alpha / \cos \beta$ は何か？ Fig. 1(a) のような分光器の場合はどうなるか？ なぜ r'/r に比例するのか？ などです。詳しくは第7回で説明されますが、どんな複雑な光学系でもある単純な法則で理解できます。それは「光源からの光の発散角（取り込

み角）を d 、集光されるとき光の収束角を d' とすると、 $s'/s = d/d'$ となる」ということです。例えば Fig. 2(a) の場合、回折格子上の光の当たっている部分の長さを l とすると、入射光の発散角は $d = l \cos \alpha / r$ 、出射光の収束角は $d' = l \cos \beta / r'$ となり、(3)式が理解できます。

集光に関する次の要素は「収差」です。例えば点を点に集光するには楕円鏡が必要ですが、これを球面鏡で代用した場合、集光された像は広がってしまいます。これを「収差」と呼びます。入射光の発散角が小さく、光の当たる部分が狭い場合には、球面でも楕円でもさほど違いはありませんが、照射範囲が広がると理想的な形状からのずれが大きくなり、収差が大きくなります。しばしば、収差は光学素子上のある点で反射された光の、到達点における位置のずれが、その光学素子上の位置座標の何次に比例するかで分類されます。最も低次の収差は Fig. 2(b) に示した焦点のずれ（デフォーカス）ですが、これは例えば出射スリットの位置をずらすなどで解消できます。それより高次の収差になると、「焦点は合っているけれどもサイズが小さくならない」ということになり厄介です。「いかに収差を減らすか」は分光器開発者の腕の見せ所と言えるでしょう。実は Fig. 1(a) に示した「基本に忠実な分光器」は収差が全くない光学系です。一方、Fig. 1(b) ではどうしても収差が生じますが、回折格子が半径 R の球面の場合には、比較的収差が小さくなる条件があります。それは $r = R \cos \alpha$ 、 $r' = R \cos \beta$ で、「ローランド条件」と呼ばれます。これは、回折格子に接する直径 R の円（ローランド円と呼びます）上に光源と出射スリットが来ることを意味します。全ての波長でこれを満たすためには複雑な機構が必要ですが、実際にそういった分光器（ローランド型分光器）も作られています。

三つ目の要素として光学素子の形状誤差（スロープエラー）があります。これは光学素子の製作技術によるもので、「平面」が実はわずかにうねっている、というような状態をさします。スロープエラーの影響は上述した高次の収差と同様で、焦点でもサイズが小さくならないこととなります。なおスロープエラーは系統的なものではありませんので「rms で1秒」などとあらわされます。当然あとから補正はできませんので、いかに精度の高い光学素子を製作するか、もしスロープエラーがあったとして、いかにその影響が少ない光学系にするか、が重要です。また、光学素子ホルダーの機械的な振動もスロープエラーと同様に考えてよいでしょう。

最後の要素として回折格子の溝の本数があります。これは第4回でも紹介されましたが、回折現象そのもの由来するもので、照射される溝の本数 N に対して分解能 $\lambda/\Delta\lambda \sim N$ となります。放射光源の発展に伴い、光源サイズや発散角が小さくなってきましたので、光源サイズや収差の影響が減って嬉しいのですが、発散角が小さいということは照射される溝の本数が減ることを意味しますので注意

が必要です。

ところで、大きな分光器の方が分解能が高いといわれますが、本当でしょうか。例えば Fig. 2 の分光器を相似を保ったまま2倍の大きさにしてみましょう（回折格子の刻線密度は角度を決めるものですので、相似を保つためには変えてはいけません）。そうすると、出射スリット位置における分散の大きさも、収差やスロープエラーによる光サイズも、すべて2倍になります（なにしろ相似ですから）。すると分散と集光で相殺して結局分解能は変わらないように思えます。ところが忘れてはいけないのが光源のサイズです。光源サイズも2倍になったら分解能は変わりませんが、今知りたいのは「同じ光源を使った場合の分光器の大きさと分解能の関係」ですので、この部分で2倍得ることになります。なお、照射される溝の本数も2倍になります。つまり、主に光源サイズか溝本数が分解能を決めているなら、「大きいことはいいことだ」と言えるでしょう。ただし光学素子など全てが大きくなりますので、製作精度とコストにも注意しなければなりません。

2.3 高フラックスを実現するための条件と問題点

分光器の性能としては、上で示した分解能以外にフラックスがあります。ただし、どんな分光器でも分解能とフラックスを両立することはできず、分解能を高くすると、試料に当たるフラックスは低くなります。第4回では、放射光源の強度として「photons/sec/0.1%b.w.」という単位について説明されていますが、これは0.1%のエネルギー幅に含まれる光子数ですから、分解能 10^3 で得られるフラックスの上限です。当然、分解能が 10^4 になれば、フラックス（の上限）はその1/10になります。実際の分光器では、例えば、分解能 10^3 では無視できた収差の影響が 10^4 では深刻になるために、取り込み角を減らさなければならなくなるなど、フラックスは1/10よりさらに低くなる場合があります。

それでは、同じ分解能でなるべく高いフラックスを得るためにはどうすればいいでしょうか。ビーム電流を増やすとかアンジュレータを用いて光源を強くするというのも1つの方法ですが、ここでは分光器の設計で高いフラックスを実現する条件を考えてみましょう。

分光器全体は、光源、反射鏡、回折格子、出射スリットによって成り立っています。この中で、回折格子の刻線数とスリット幅および回折格子とスリット間の距離は分解能を決めますので固定して考えます。残りは反射鏡と回折格子の反射率です。これを上げることでフラックスを上げることができます。Fig. 3 に反射鏡の反射面によく使われている金の反射率の入射角度依存性の計算値を示します。この計算は、複素屈折率のテーブル¹⁾から以下の(4, 5)式²⁾を用いて計算したものです。

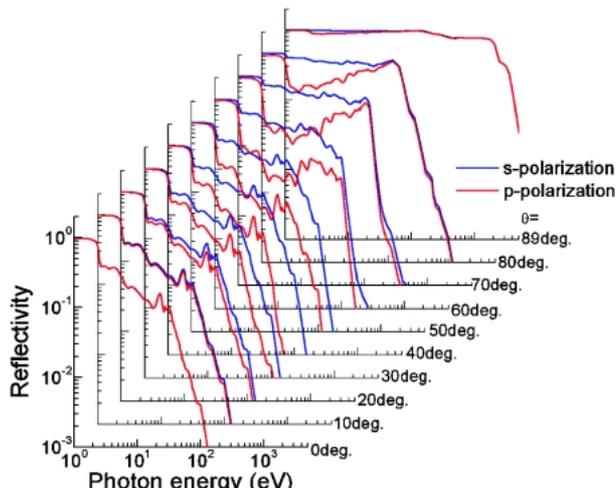


Fig. 3 Incident angle and polarization dependence of reflectivity spectra of gold as a function of photon energy.

$$R_s(E) = \left| \frac{2 \cos \theta}{\cos \theta + (\hat{n}^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right|^2 \quad (4)$$

$$R_p(E) = \left| \frac{\hat{n}^2 \cos \theta - (\hat{n}^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{\hat{n}^2 \cos \theta + (\hat{n}^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right|^2 \quad (5)$$

ここで \hat{n} は複素屈折率で屈折率 n と消衰係数 κ を使って $\hat{n} = n + i\kappa$ とあらわされます。 θ は反射面の垂直方向からの入射角です。ここで2種類の反射率の式がありますが、前者は偏光ベクトルが反射鏡に平行 (s 偏光。入射面に垂直とも言います) のもの、後者は垂直のもの (p 偏光。入射面に平行) を示しています。

Fig. 3 を見ると、直入射 ($\theta = 0$ deg.) での反射率はエネルギーが高くなるとともに急激に減少します。50 eV 以下では反射率は10%以上ですが、100 eV 以上では0.1%程度です。つまり100 eV では鏡で1回反射すると強度が1/1000になってしまいます。これではいくら強力な光源を持ってきても、何枚も鏡が入った光学系では、試料に届くまでに強度が激減してしまい使い物になりません。100 eV での反射率を上げるためには、入射角を大きくする必要があります（繰り返しますが、直入射を 0° と定義します）。例えば、 70° 以上の入射角では反射率が40%程度になり、高いフラックスを期待できます。後で実際の分光器の例が示されますが、SX 領域ではほぼ直線的に光学素子が並んでいるのはこのように入射角を大きくとる（つまり光学素子に対して斜めすれすれに光が入射し、斜めすれすれに出射する）からです。しかし、入射角が大きければ大きいほどよいというわけではありません。光の純度が重要になります。このことは次の「高次光・迷光・偏光」でお話しましょう。

さらに強度をあげたい場合には、光学素子の数を減らすという方法が考えられます。しかしながら、光学素子を減

らすことは、1枚の素子に複数の役目を持たせることにつながります。これは、例えば反射鏡の表面形状を複雑にします。光学素子は複雑な形状になると製作時の形状誤差が大きくなり、その結果、光源本来の性能を損なってしまう場合があります。このため、強度の観点だけで光学素子の枚数を減らすよりも、単純な形状の反射鏡や回折格子を選択した方がビームライン全体の性能として有利な場合があります。光学素子の数を減らす際には十分な配慮が必要です。

2.4 高次光・迷光・偏光

(a) 高次光

回折格子で分光された光は、(1)式で示されているように、基本波 ($m = \pm 1$) だけではなく、高次の光も同じ角度に表れます。その光の波長は、基本波の整数分の1で、エネルギーでは整数倍になります。つまり回折格子で分光された光は単色ではなく、高次光を含んでいます。それでは、基本波のみを使いたい場合はどうすればいいでしょうか。この方法としてまず考えられるのは、基本波と2次光の間にカットオフがあるローパスフィルターを入れることです。紫外光より低エネルギー側では、多くの絶縁体や半導体のバンドギャップがあるため、それらをローパスフィルターとして利用できます。しかしながら、固体で最もバンドギャップが大きな物質はフッ化リチウム (LiF) で、その大きさは約10 eVです。それ以上のエネルギーギャップを持つ物質は存在しません。それより高いエネルギー用のフィルターとしては、透過型と反射型のものがあります。透過型のフィルターでは、金属や半導体の薄膜が主に用いられます。これは Fig. 4 に示したように物質の内殻吸収の吸収端を使って高次光をおとすもので、多くの種類の薄膜が市販されています。ただし、薄膜フィルターの透過率は多くの場合10%以下となり、フラックスが必要な実験には向きません。

VUV・SX 領域で主に用いられている高次光除去の方法は、反射鏡や回折格子の反射率の波長・入射角依存性を利用するものです。Fig. 3 で示されているように、反射率は高エネルギーに向かって急激に減少します。また、この急激に反射率が減少するエネルギーは、入射角度に依存します。よって、入射角を使いたいエネルギーにあわせることによって高次光が除去できます。反射鏡の角度が固定されている場合には、反射面の材質を変えて高次光を除去することもあります。

さらに、回折格子の干渉を利用する場合があります。ラミナー回折格子では、溝の外側の面と内側の面で光が干渉します。この溝の深さは使いたいエネルギーの光が強くなるように設定します。その場合、偶数倍のエネルギーの光は逆位相の干渉により弱め合います。このことによって、偶数次の高次光は落とすことができます。

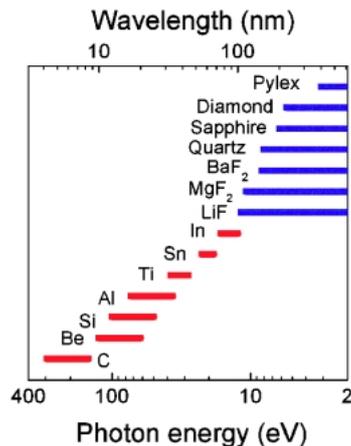


Fig. 4 Effective region of bulk (blue lines) and thin film (red lines) filters.

(b) 迷光

2.1で示されているように、回折格子は、光の波長を角度に変換するものです。つまり、放射光のような白色光を回折格子に当てると、光は広い角度に分散されます。使いたい光を射出スリットに通したいのですが、それ以外の光も、分光器容器内を多重反射して射出スリットを通ることがあります。また、特定の波長の光をスリットで切り出したつもりでも、実際には回折格子の精度や光学素子の汚れなどで目的以外の不必要な光が出てくる場合があります。このような不必要な光を迷光といいます。迷光を除去するためには、散乱光が射出スリットに到達しないように分光器の設計を工夫することが第一ですが、その他に光学素子にはほこり等をつけないようにする気配りが大切です。

(c) 偏光

偏向電磁石からの放射光の軌道面上は水平直線偏光をしており、アンジュレータからの光はアンジュレータの磁石配列を反映した直線・円偏光などを作り出すことができます。この偏光特性を使うことで、物質の電子雲の方向や磁気モーメントの方向を決めることができ大変有効です。しかしながら、偏光を損なわずに試料まで導くためには、分光器も工夫が必要です。

Fig. 3 では2つの偏光方向に対する反射率の入射角依存性が示されています。入射角0度付近や90度付近では偏光方向の違いによる反射率の差は表れませんが、途中の角度では、大きなずれが生じています。Fig. 5(a)は、10 eV, 100 eV, 1 keVの光エネルギーでの金の反射率の角度依存性を示しています。この計算も(4), (5)式を用いました。この図から、s偏光では0度から90度に向かって単調に反射率が上がりますが、p偏光では、ある角度で極小をとることがわかります。この極小をとる角度はブリュースター(Bruster)角として知られています。

ブリュースター角近傍では、s偏光に比べてp偏光の反

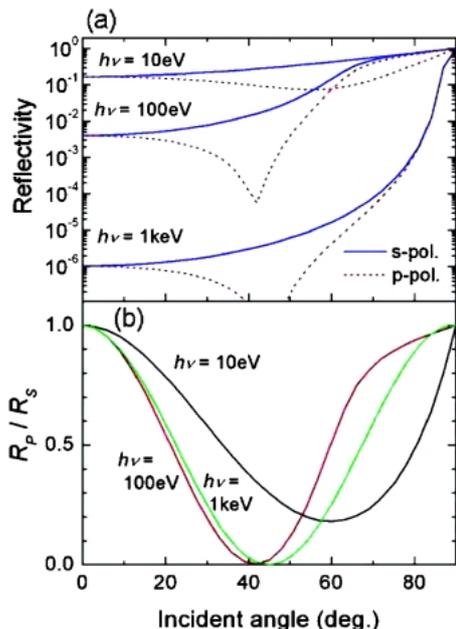


Fig. 5 (a) reflectivity of gold as a function of incident angle at 10, 100 eV and 1 keV. (b) The reflectivity ratio of p- from s-polarization as a function of incident angle.

射率が極端に落ちますので、光源の偏光が崩れてしまいます。2つの偏光の反射率の比を Fig. 5(b) に示しますが、p 偏光の反射率は s 偏光に比べて 10 eV の光でも約 20%、100 eV や 1 keV の光ではほとんど 0 になります。これは、反射直線偏光素子に使われている原理です。一方で、光源の偏光度をあまり変化させずに試料位置まで光を導くためには、0 度付近 (直入射領域) か 90 度付近 (斜入射領域) を採用する必要があります。実際には、フラックスや高次光除去が必要ですので、VUV 領域では主に直入射光学系、SX 領域では主に斜入射光学系が採用されています。

3. 実際のビームラインおよび分光器の例

3.1 前置集光系+入射スリット

分光器における「光源」は、もちろん放射光源そのものである場合もあります。ところがその場合、光源サイズは放射光源の性能によって決まってしまう。また、もし光源の位置が動いてしまったら、結果的に取り出される波長が変わってしまいます。こうした問題を避けるために、しばしば「入射スリット」を用意し、そこを仮想的な光源として分光器を設置します。Fig. 6 に、入射スリットのあるビームラインの例を示します。入射スリットを本当の放射光源の位置に設置することは現実的ではありませんので、一旦発散した光を入射スリットに集光する必要があります。このための光学系が「前置集光系」と呼ばれます。前置集光系を用いることの利点として、(1)入射スリットの開口によって実質的な光源サイズを制御できる (ただしサ

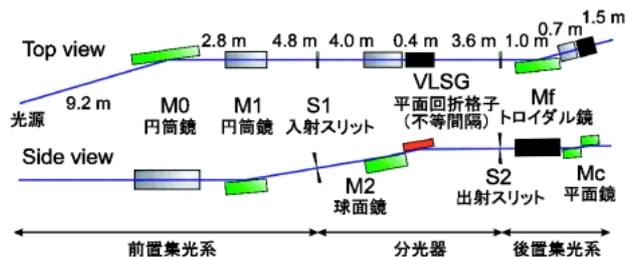


Fig. 6 Schematic layout of a typical beamline with a grazing incidence monochromator.

イズを小さくすればフラックスが下がります), (2)光源の変動の波長に対する影響を減らせる (ただし光源が変動すると集光された光がスリットの開口部からずれるのでフラックスは下がります), (3)前置集光系の縮小率を上げることで、フラックスを下げずに実効的な光源サイズを小さくできる (ただし発散角が大きくなり、収差の影響が大きくなります), などが挙げられます。また、放射光源に一番近い光学素子はしばしば大きな熱負荷を受けますが、前置集光系があればその影響は入射スリットにおける光の広がりやずれとなり、少なくとも分解能や波長への影響は軽減されます。一方、前置集光系の欠点としては、(1)光学素子の数が増えるためフラックスが下がる, (2)ビームラインの全長が決まっている場合、分光器の部分が短くなる, などがあります。放射光源のサイズや安定性はどんどん進歩していますので、最近では前置集光系のないビームラインも増えています。

ところで、分光という観点からはスリットの開口の方向 (Fig. 6 に示したビームラインでは上下方向) にだけ集光すれば良いのですが、実際にはそれと垂直な方向もある程度集光しておかないと、あとで試料位置に集光するとき不都合が生じる場合が多いので、しばしば両方向の集光が行われます。詳しくは第 7 回で紹介されますが、Fig. 6 の前置集光系は Kirkpatrick-Baez 光学系と呼ばれ、二枚の円筒鏡 (M0, M1) がそれぞれ横振り横集光, 縦振り縦集光というように分業しています。この光学系は縦横を自由に集光できる上に、比較的収差が小さいという利点があります。もちろん横振り縦集光なども可能で、この場合は「雨どい」のような形の円筒鏡などが使われます。この方式はサジタル集光と呼ばれるのですが、実はスロープエラーの影響が小さいという利点があり、特に発散角が小さくて収差があまり問題にならない場合に有効です。また、光学素子を減らすという観点から、縦横両方に別々の曲率をもった、トロイダル鏡と呼ばれるもので一度に集光してしまうこともあります。

3.2 分光器

入射スリットのあるビームラインの場合、入射スリットから出射スリットまでが「分光器」となります。もちろん

入射スリットがない場合は光源から出射スリットまでが分光器です。波長範囲、分解能、フラックスなどの要請は実験によって大きく異なりますので、「これが最高」という分光器は存在せず、様々なものが作られています。以下、斜入射領域と直入射領域に分けて実際の分光器の例を紹介しますが、その前に「偏角」についてお話しておきます。偏角とは Fig. 1 の記号でかくと α - β にあたり (α , β の符号に注意), 回折格子への入射光と (欲しい波長の) 回折光がなす角です。偏角は, 分散の大きさ, 縮小率, スロープエラーの影響の大小, 回折効率など多くの条件に影響します。偏角が一定の分光器を「定偏角型」, 何らかの機構で偏角が変えられるものを「可変偏角型」と呼びます。当然, 定偏角型の方がシンプルですが, (1)式の他に α - β が一定という条件が増えますので自由度は少なくなり, 広い波長範囲で高い性能を得ることが難しくなります。以下にいくつか紹介しますが, α と β に特別な条件を課す分光器は, 必然的に可変偏角型となります。

(a) 斜入射領域

まず, 平面回折格子を用いる分光器から紹介します。平面回折格子は基本的に「分散」しかしてくれませんので, 他に「集光」素子が必要です。Fig. 1(a) に示した分光器は, ある意味で理想的ですが, 光学素子の数という意味では不利です。また, 放物面鏡の加工は難しいので, ある程度分解能を犠牲にして円筒鏡などで代用した類似の分光器も多く作られてきました。発散角が小さい光源の場合には, それでも収差の影響が小さく, 相当よい性能が得られています (通称 Collimated Plane Grating Monochromator³⁾)。もっと大胆に, 「放射光は指向性が高いので平行光とみなそう」と考えて平行化ミラーを省略した例もあります。一方, 別の発想として, 発散光をそのまま平面回折格子に照射し, α と β にある条件を課すことで, 回折光を一枚の集光鏡 (楕円鏡等) で集光する分光器も開発されています (通称 SX-700⁴⁾)。

球面回折格子を用いるものとしてはローランド型分光器が, かなり初期に開発されました (通称グラスホッパー⁵⁾)。ただし, ローランド条件を満たすために結果的に多くの光学素子が必要となり, しかも駆動機構が複雑になります。その後, ローランド条件をあきらめて一番低次の収差 (デフォーカス) のみを打ち消すという大胆な発想の定偏角分光器が開発されました (通称ドラゴン⁶⁾)。デフォーカスを打ち消す方法は単純で, 波長に応じて出射スリットを焦点の位置まで動かすというものです。

ここ10年ほどでにわかに発展したのが「不等刻線間隔」回折格子 (VLSG; Varied Line Spacing Grating) です。これは溝の間隔が一定でなく, 位置によって変わるといいます。VLSG の場合には回折の式がどうなるのかが気になるのですが, 単純に, 回折格子のそれぞれの位置で (1) 式が成り立つ (n はその位置での刻線密度) と考えて構いません。従って, 刻線間隔をうまく設計すれば平面

回折格子でも「分散」と「集光」が一度に可能なのですが, そのためには α と β に厳しい条件が課されます⁷⁾。それに対して Fig. 6 に示す分光器では, VLSG 回折格子の上流に一枚だけ集光素子を加えることによって, 定偏角でも比較的高分解能を達成することに成功しています⁸⁾。最近はこれに可変偏角機能を加えた分光器も作られています⁹⁾。

(b) 直入射領域

Fig. 3 で示したように, 直入射領域では高いエネルギーの光は反射されません。一般に直入射領域の分光器は, 最大40 eV 程度までカバーします。直入射配置では, 回折格子とスリット間の距離が長く取れますので, 比較的高い分解能が期待できます。

これまで作られてきた直入射分光器の代表的なものとしては, (Off-plane) Eagle 型分光器があります。Eagle 型分光器は典型的な直入射分光器といえるもので, ローランド条件を満足するように入射・出射スリットと球面回折格子を配置します。分光測定を行うためには, 入射と出射のパスを替える必要があるため, それぞれのスリットをローランド円の垂直方向上下にずらして配置し, Off-plane Eagle 型分光器と呼ばれます。簡便な分光としては, 瀬谷波岡型分光器があります。偏角を $70^{\circ}15'$ にすることによって, 回折格子の回転のみで広いエネルギー範囲をカバーできます。この分光器は操作が簡単なために, 20年ほど前には広く普及しました。しかしながら, エネルギー分解能が高くできないことや光源の偏光が保存しないことなどの欠点があり, 現在ではあまり使われなくなっています。また, 最近の光源の低エミッタンス性を利用し入射スリットを省いた Wadsworth 型分光器も採用されるようになってきました。Wadsworth 型分光器は入射光を平行光線であると仮定した直入射光学系ですが, アンジュレータ光を用いることで擬似的に平行光束とみなすことができます。実際には, 発光点から遠い位置に球面回折格子を配置し, 縮小光学系で出射スリット上に焦点を結びます。このことで, 光源の大きさを縮小した入射スリットを用いた Eagle 型分光器と同様の分解能が期待できます。

3.3 後置集光系

「分光」は出射スリットで完結しますが, 出射スリットの位置に直接試料をおいて実験をすることはほとんどありません。色々なユーザーが様々な実験を行う放射光施設では, 出射スリットと試料を同じ位置におくのは難しいでしょう。そこで通常は出射スリットを通った光をもう一度集光する「後置集光系」を設置します。後置集光系では, スリットの開口方向 (Fig. 6 では上下方向) に関しては出射スリットが仮想光源となります。一方, それと垂直な方向は前置集光系でどのような集光をしたかにもよりますし, 分光器の中でも何らかの影響を受ける場合がありますので, それらとの組み合わせで考える必要があります。光学系は基本的に前置集光系と同様で, 要求されるビームサイ

ズなどに応じて2枚のミラーを使う場合もあれば1枚のトロイダル鏡で済ませる場合もあります。もちろん、いずれの場合もエネルギー分解能には影響しません。

なお、Fig. 6にはMcとして2枚組みのミラーシステムが入っていますが、これは2.4で述べた、反射率を利用して高次光を除去するためのシステムです。厳密な意味では後置「集光」系ではありませんが、しばしばこの位置におかれるので参考までに示しておきました。

4. おわりに

VUV・SX領域の分光器は数え切れないほどのバリエーションがありますが、基本は「分散」と「集光」にあることが理解いただけましたでしょうか。分解能重視、フラックス重視など、それぞれの分光器にはそれぞれのコンセプトがあるわけですが、究極の分光器があるとすれば、それは途中で光強度を全くロスせずに、しかも出射スリットにおいて完全に線に集光するものでしょう。これならスリットの開口によって必要な分解能とそれに対応するフラックス（あるいはその逆）を得られます。いかにその究極の分光器に近づけていくか、あるいはいかに妥協するか、これからは創意工夫は続くでしょう。また、本稿ではあまり触れませんでした。波長の安定性も重要な要素です。光源の安定性についてはすでに述べましたが、その他にも例えば温度変化によって架台が伸縮し、スリットの位置が変わってしまったら、取り出される波長は変わってしまいます。もちろん光学素子の温度にも気を配らないといけません。まだまだ課題は山積みです。

分光器の進歩は技術の進歩と表裏一体です。回折格子一つとってみても、曲率半径の精度（球面の場合）、スロープエラー、刻線のしかた（不等間隔など）、などの向上につれて、それを生かした新しいタイプの分光器が出現してきました。光学素子の加工精度が上がって放物面鏡や楕円

鏡がスロープエラー0.1秒以下で製作できるようになったら…、駆動機構の精度が上がって複雑な動き（回転と並進の同期など）を角度0.01秒、位置0.01 μm の精度で（しかもそこそこ安く）実現できたら…、10 μm の大きさで発散角が10 μrad の光源があったら…、などと夢は膨らみます。一方で、そういった技術の進歩なしでも、意外なアイデアからもっといい分光器が生まれるかもしれません。基本はすでに述べたような単純なものですので、みなさんも新しい分光器を考えてみませんか。

お願い

本シリーズでは、初心者ユーザが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な経験談を募集しております。最終回でご紹介したいと考えております。また、本シリーズに関してご意見・ご要望がございましたら編集担当（SPRING-8 JASRI 大橋治彦/hohashi@spring8.or.jp, KEK-PF 平野馨一/keiichi.hirano@kek.jp）までどうぞお便りください。

参考文献

- 1) E. D. Palick (eds.): "Handbook of Optical Constants of Solids", (Academic Press, Inc. 1985).
- 2) M. Dressel and G. Gruner: "Electrodynamics of Solids", Cambridge University Press, 2002.
- 3) R. Follath and F. Senf: Nucl. Instrum. Method, A **390**, 388 (1997).
- 4) H. Petersen: Opt. Commun. **40**, 402 (1982).
- 5) F. C. Brown, R. Z. Bachrach and N. Lien: Nucl. Instrum. Method **154**, 73 (1978).
- 6) C. T. Chen: Nucl. Instrum. Method, A **256**, 595 (1987).
- 7) M. Itou, T. Harada and T. Kita: Appl. Opt. **28**, 146 (1989).
- 8) M. C. Hettrick, J. H. Underwood, P. J. Batson and M. J. Eckart: Appl. Opt. **27**, 200 (1988).
- 9) K. Amemiya and T. Ohta: J. Synchrotron Rad. **11**, 171 (2004).