

光のエネルギーを切り出す (基礎編)

繁政英治 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 : sigemasa@ims.ac.jp
矢橋牧名 勸高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
 E-mail : yabashi@spring8.or.jp

1. はじめに

第2回、第3回では、「光を安全に取り出す。」という観点から、放射線遮蔽、インターロックやフロントエンド等、安全な利用実験に不可欠な装備・装置の仕組みや役割について説明がなされました。人体への悪影響が懸念されるX線や γ 線の被爆事故を避けることがインターロックの最重点課題であることや、余分な光を吸収し、ビームライン光学系に必要な光のみを安定に供給しているフロントエンドの重要性がお分かり頂けたと思います。第4回から6回は、「光のエネルギーを切り出す。」というタイトルで、多くのビームラインでその根幹をなし、ビームラインの外観を特徴付けている「分光器」についての解説になります。最初となる第4回では、光のエネルギーを切り出すために必要な道具立てとは何か、またそれはどのような物理現象に基づいて機能しているのか、その基礎について分かり易く説明することを試みます。

現在実施されている放射光利用実験では、多くの場合分光器を用いて必要なエネルギー幅の光を切り出して利用しています。利用する光エネルギーE(或いは波長 λ)において、分光器により切り出されるエネルギー幅 ΔE (波長幅 $\Delta\lambda$)は、分光器の性能を表す指標の一つです。 $E/\Delta E$ ($\lambda/\Delta\lambda$)で定義される量を分解能と呼び、この値が大きいもの程分解能が高い分光器であると言えます。例えば、光を物質に照射して飛び出してくる電子のエネルギーを分析し、その電子がどのような状態にあったのかを調べる光電子分光法について考えてみましょう。この際、入射する光のエネルギー幅は、電子のエネルギー分布に直接反映されます。つまり、観測される電子のエネルギー分布は、光のエネルギー幅が加わったものになります。従って、観測したい状態に見合った十分に狭いエネルギー幅の光を用いることが必要になります。具体的には、孤立した分子について、光電子分光で振動構造を観測しようと思えば、 ΔE は100 meV以下が必須です。しかも、ただ分解能が高ければ良いだけではなく、光の強度も十分に高い(観測する装置にも依りますが、 $\sim 10^{10}$ 光子数/秒以上)ことが合わせて求められます。光のエネルギーが100 eVなら分解能は

1000で済みますが、10 keVでは100,000の分解能が必要であることを意味します。100 eVで分解能100,000だとすると、1 meV相当の幅なので、かなり大変そうですが、さて、10 keVの場合はどうなのでしょう？ 本稿を最後まで読んで頂くとその答えが分かります。

ここでは、まず、光とは何かということについてお話しすることにしましょう。それは、光の基本的性質と振る舞いは、ビームラインで使われている様々な光学素子の働きを理解する礎となるものであり、最も重要であると考えられるからです。

2. 光とは何か

2.1 種類と性質

我々の身の周りは昼夜を問わず光に満ちあふれています。カーテンの隙間から差し込む朝の日差し、燦々と降り注ぐ太陽の光が青い水面に眩しいビーチサイド(恐らく季節はずれでしょうが)、赤い照、青い照、目映いばかりのネオン街(流川が懐かしい)。一般に光と言えば我々の目に見える光、つまり可視光の事を指します。しかし、広い意味で光とは、電場と磁場が空間的・時間的に振動する横波、いわゆる電磁波であり、その性質は波長(或いは振動数又はエネルギー)によって特徴付けられます。**Fig. 1**に電磁波を波長や振動数で分類したものを典型的な用途と共に示しました。我々の目に感じる事が出来る可視光は、ごく狭い領域であることがお分かり頂けるでしょう。通信に使われる波長の長い電波も、レントゲン写真に使われる波長の短いX線も、その伝搬速度は光速に等しく、同一の物理法則に従います。**Fig. 1**中の黄色で示した部分は、多くの放射光施設で供給可能な放射光の波長領域を示しています。エネルギーの高い電子を蓄積するほど、つまり規模の大きな施設ほど波長の短いX線を供給することが出来ます。さて、同じ物理法則に従うとは言っても、**Fig. 1**中の電磁波だけで20桁近くの広い範囲に及ぶのですから、例えば、赤外線とX線とは全く質的に異なる性質のものとして観測されることは容易に想像できるでしょう。光は波動的な振る舞いと粒子的な振る舞いと両方の性質

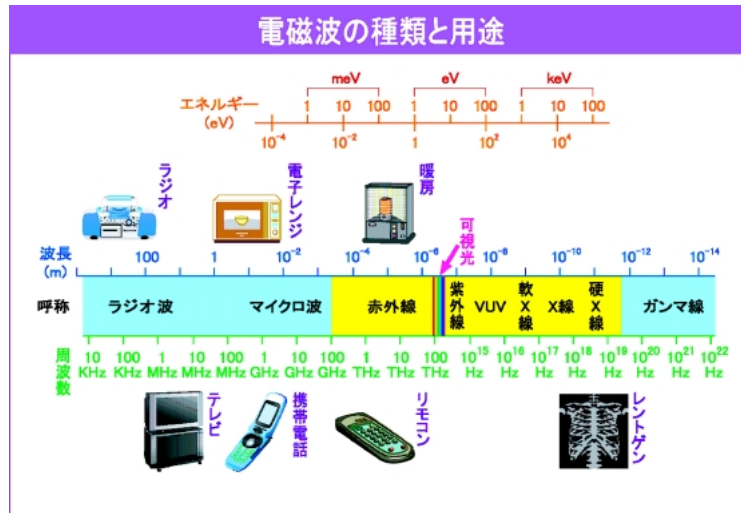


Fig. 1 Spectrum of electromagnetic radiation in terms of energy, wavelength, and frequency.

を示すこと（二重性）はよく知られていることですが、後述するように、波長の長いものほど波動的な、逆に短いほど粒子的な性質を利用して観測することが出来ます。

光と物質の相互作用を微視的なスケールで見れば、それは光と原子の相互作用を考えることになります。原子と光の相互作用を正しく取り扱うには、量子電磁力学という厳めしい名前の学問の知識が必要になります。それによれば、原子が光と相互作用する際には、光は粒子として振る舞い、この粒子を光子と呼びます。光子のエネルギーは、波長に反比例（振動数に比例）します。Fig. 1中の上部に示したエネルギースケールは、光子のエネルギーを表しています。アインシュタインが光の粒子性を仮定して見事に説明した光電効果（金属表面に光を照射すると電子が飛び出す現象）は、材料に依っては可視光でも起こすことが出来ます。波長が短いX線の光子1個のエネルギーは、可視光のそれに比べて1000倍以上にもなります。このため、適当な検出器を用いれば、一つ二つと計数するのに十分な信号の元になり得るのです。しかし、電波の光子のエネルギーは、可視光の光子に対して1億分の1程度ですから、どんな検出器を使っても、電波の光子を数えることは出来ません。電波を検知するには、多量の光子が必要になり、結局のところ、多量の光子によって顕在化する波動的な側面を信号として観測するしかないので。

光には、チリやごみなど細かい粒子、或いは究極的には原子や分子に衝突すると、周囲に広がる性質（散乱）があります。He-Neレーザーの赤い光が光線として目に見えるのは、空気中のチリやゴミに散乱された赤い光が目が届くためですし、晴天時に空が青く見えるのは、大気中の分子により太陽からの可視光が散乱された結果です。また、光には、性質の異なる物質の境界を通過する際に進行方向が曲がる性質（屈折）があります。最も身近な例は、レンズによる集光でしょうか。太陽光線を虫眼鏡で狭い領域に

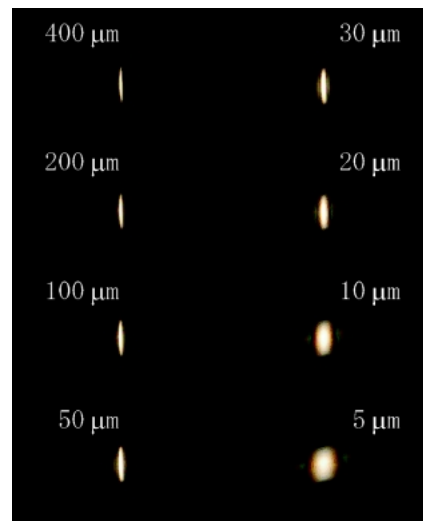


Fig. 2 Single slit diffraction patterns for different slit widths.

集めて、黒い紙に火を付けるといったことは、正に屈折のなせる技と言えます。更に、光は、狭い隙間を通り抜けた後に、直進しないで広がる性質（回折）があります。回折という現象は、防波堤に打ち寄せる波や衝立の裏側に回り込む音波など、どんな波動にも見られますが、波長と同程度の間隙にならないと顕著に表れない性質があります。Fig. 1に示したように、可視光の波長範囲はザッと400～700 nm程度ですから、可視光の回折現象を観測するために用意すべき隙間はμmオーダーと予想されます。従って、我々の身の回りで顕著な観測例を見つけることは難しいと言えます。実際に光の回折現象を例示するために、平行光線をスリットで細く切り出す実験を行いました。Fig. 2に結果を示します。ある程度スリットを狭めたところから、こちらの意図に反してビームがどんどん広がり始め、しかも両側に縞模様を観測されます。この縞模様は、回折

によりいろいろな方向に進む複数の波が重なって、お互いを強め合ったり、弱め合ったりする干渉と呼ばれる現象の結果現れたものです。回折と干渉については、第3章で詳しく説明します。

我々の身の回りで見られる屈折や反射、例えば風呂のお湯の中に入れた自分の指が短く見える現象や、夕日に照らされたビルの窓が眩しいことを説明する際には、二重性という光の本質を考慮する必要はありません。多くの場合、光を光線として取り扱う、幾何光学で十分に説明することが出来ます。しかし、以下のサブセクションでは、敢えて光の波としての性質を強調して、屈折と反射等の光学現象の本質について説明したいと思います。

2.2 屈折と反射

光のエネルギーを切り出すことを可視光領域で考えることにします。太陽や電球の光など、いろいろな波長の光が混ざったものを白色光と呼びますが、エネルギーを切り出すとは光の波長を選択することであり、可視光の場合には、何らかの方法で綺麗な虹を作り、その中のある特定の色を取り出すことに相当します。雨上がりの空に架かった虹や、CDやDVDの記録面、或いは水溜まりに浮かんだオイルなど、普段の暮らしの中でも虹色を目にする機会は少なくありません。ガラスのプリズムを使って太陽光を虹に分ける実験を行った経験がある人もいます。この実験を最初に行ったのはニュートンだそうですが、彼は観測した色の帯をスペクトルと名付けました。現在では、光のみならず、波動性と粒子性を併せ持った電子などについても、エネルギー別の分布をスペクトルと呼んでいます。**Fig. 3**にプリズムによる白色光のスペクトル分解写真を示します。光源には車のルームランプを用い、太陽光線と同様の平行光線を得るために、スリットとレンズを用いています。空気中を飛んできた白色光が、大きくその進行方向を変えて、スペクトルに分解している様子が見取れます。これは、光がプリズムに入る時とプリズムから空気中に出る時に屈折することに起因します。光の屈折の仕方には波長依存性があり（分散）、波長の短い光の方が大きく屈折します。（この分散性がないのが真空です。）また、よく見ると一部の光は境界面で反射されています。屈折の法則、反射の法則としてよく知られるこのような光学現象は、光が物質に入った時に起こる変化の結果です。これを微視的な視点で捉えれば、物質を構成する原子に光が及ぼした効果が巨視的に現れたものと考えることが出来ます。

静かな水面に小石を落とした場面を想像して下さい。水面に円状の波の輪が次々と広がる様子が脳裏に浮かぶと思います。同一円上の山（或いは谷）が一定の速度で外側に広がって行くのですが、このような波の形状が移動する速度を位相速度と言います。ある時刻において、同一円上にある山の部分は同じ位相にあり、同一位相にある点を繋ぐ

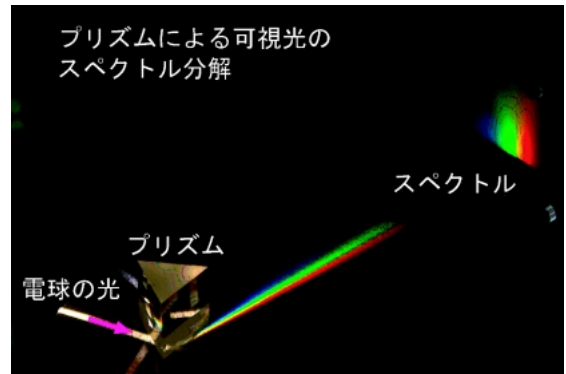


Fig. 3 The visible light spectrum using a prism.

と円形状になっていますから、このような波動を円形波と呼びます。これを三次元に拡張しましょう。理想的な点から発せられる光は、全空間に等方的に放射されると考えられます。従って、ある時刻において、同一位相の点を繋ぐと、その形状（波面）は球面になりますので、これを球面波と呼びます。点光源から出た光の波面は球面ですが、発光点から離れた場所において、発光点からの距離に比べて小さな空間で見れば、その波面は平面と見なすことが出来ます。平面波では、どの位置でも波の進む方向は波面に垂直に揃っているのですから、平面波が作る光線は平行光線になります。先述の通り、太陽光線は平行光線として取り扱われますが、これは、地球から太陽までの距離は、我々が通常暮らしている空間のサイズに比べて遙かに大きいので、平面波で近似しても良いとの考えに基づいています。

Fig. 3のように、平面波がプリズムの表面にある角度で入射する場面を微視的に考えてみましょう。プリズムの表面には無数の原子が整然と並んでいると考えられますが、電磁波の波面が原子に到達するとどうなるのでしょうか？一般に、原子は光の性質には何らの影響も及ぼさずその方向だけを変える働きをします。これを弾性散乱と呼びます。光が偏光していなければ、原子による弾性散乱光はいろいろな方向に放射されますので、光で照射された物質中の個々の原子は、球面電磁波を放射する点光源と見なすことが出来るのです。**Fig. 4**に平面波がプリズムの表面に入射される際の反射波と屈折波が生じる様子を模式的に示しました。入射平面波の波面の一端がプリズムの表面に到達すると、そこに有った原子は直ちに散乱球面波の放射を始めます。ところが、プリズムの内部に放射された光の速度は、その屈折率の大きさのために、大気中の光速度よりも遅くなります。つまり、放射球面波の広がり方が表面を境に異なったものになります。**Fig. 4**の赤で示した半円は、ある表面の原子から大気側に放射された球面波を、黄色は同じ原子からプリズム内部に放射されたものを表しています。図中には代表的な三つの点についてしか散乱球面波の波面が描かれていませんが、表面にずらりと並んだ原子に対して次々と平面波の波面が到達し、それらが逐次球面波

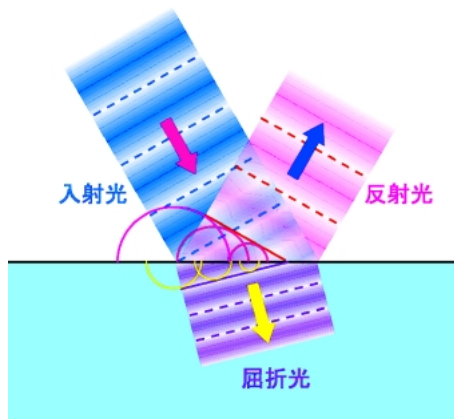


Fig. 4 Schematic representation of refraction and reflection.

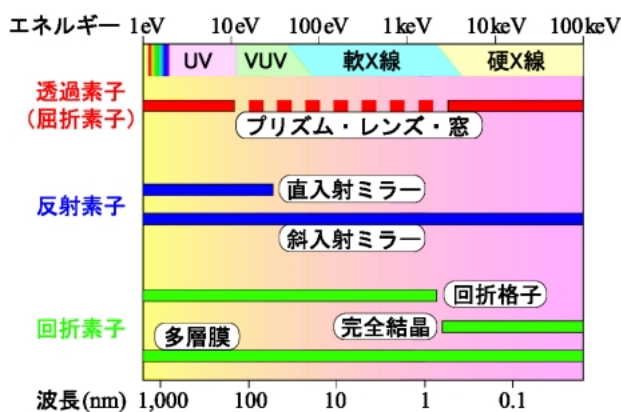


Fig. 5 Variation of available optical elements at different wavelengths.

の波源になって行きます。これら散乱球面波を足し合わせた結果として、赤い半円の接線を波面とする反射光と、黄色い半円の接線を波面とする屈折光になるのです。幾何光学では法則として与えられていた反射と屈折という現象は、このようにして説明することが出来ます。ここで見てきたように、反射も屈折も表面原子の散乱に起因する訳ですから、表面の状態、特に平滑度が光学素子の性能を特徴付ける非常に重要な要素となることがお分かり頂けるでしょう。

Fig. 5 に放射光が主としてカバーするエネルギー領域において利用される光学素子の種類と、それらが利用可能なエネルギー領域の関係を示しました。可視光に対して透明なレンズなどの透過型素子も、凡そ10 eV 以上の紫外光に対しては不透明です（つまり吸収されてしまいます）。このエネルギー領域の光は、空気にさえも容易に吸収されてしまうため、その利用には真空が必須となります。これが、真空紫外光 (Vacuum Ultra Violet; VUV) と呼ばれる所以です。VUV から軟 X 線にかけての領域の光に対しては透明な物質がありませんので、一般に透過型素子は利用できません。しかし、凡そ 4 keV 以上の硬 X 線になる

と、物質を透過する能力(透過能)が十分に高くなるので、再び透過型素子が使えるようになります。反射型素子の鏡の場合、光エネルギーに対する表面材料の反射率が問題になります。放射光用の鏡のコート材には金や白金が用いられることが多いですが、これら金属の反射率は光の表面に対する入射角と光エネルギーの両方に依存します。表面に対して垂直に近い角度で入射する直入射配置の場合、30 eV より低エネルギーの光に対しては10%以上の反射率がありますが、それ以上の光に対しては急激に反射率が低下します。現実問題として、直入射配置が実用になるのは、40 eV 以下のエネルギー領域です。鏡の表面に近い角度で入射する場合を斜入射配置と呼びますが、この場合でも、反射率は入射角とエネルギーに依存します。同じエネルギーの光なら、なるべく表面スレスレに入射した方が反射率は高くなります。また、同じ入射角ならエネルギーが高い光ほど反射率は低くなります。透過能の高い硬 X 線を反射する鏡の場合、入射光が表面から内部に入らず全て反射する条件で利用されますが、その時の入射角度は表面から1度以下になります。このように極端な斜入射配置を採らざるを得ないので、X 線用の鏡は全長の長いものが必要になるのです。回折素子には、主に VUV から軟 X 線領域で用いられる鏡面に周期的な溝を刻んだ回折格子、主として硬 X 線に用いられる原子が3次元的な周期構造を持って配列した完全結晶、更に、広いエネルギー領域で利用可能な、異なる材料を周期的に積層した多層膜があります。

3. 光の干渉と回折

Fig. 2 で示した光の回折という振る舞いは、「光は直進する」という直感的なイメージから外れています。何故そのような振る舞いが観測されたのかについてももう少し調べてみましょう。スクリーンに開けられた幅 a のピンホールに波長 λ の平面波が入るという状況を考えます。例えば $a = \lambda$ として、ピンホールを透過した光（回折光）の振幅を図示すると、Fig. 6 のようになります。これは、空間上の各点において、開口内から生じる2次的な波動場の振幅を全て足し合わせる、という演算（フレネル-キルヒホッフの回折積分と呼ばれています）を行った結果です。これを見ると、回折光はあたかも球面波のように拡がって、スクリーンの影の部分にもまわりこんでいくのがわかります。一般に、回折光の拡がりの角度（発散角） σ はおおよそ λ/a で与えられます。したがって開口が波長に比べて十分大きい場合 ($a \gg \lambda$) は回折の影響は僅かですが、この例のように a が小さくなって λ に近づくにつれ顕著になります。

先述の通り、回折光に明暗が現れるのは、波動に付随する干渉という現象のためです。ここでは、干渉という現象をより明確に示すために、Fig. 6 と同じピンホールを間隔

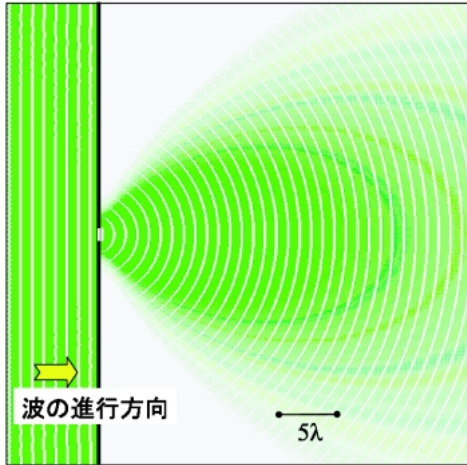


Fig. 6 Calculated diffraction pattern through a single slit. Slit width a is equal to wavelength λ . White lines show wavefronts.

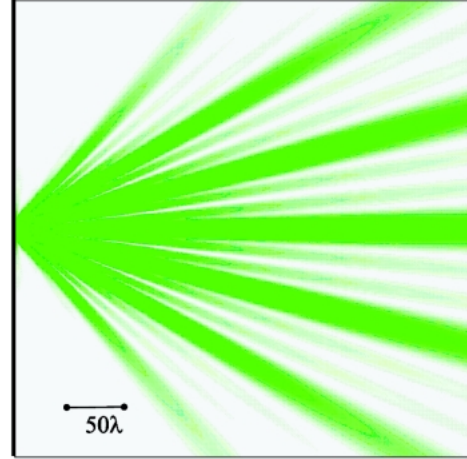


Fig. 8 Calculated diffraction pattern through quadruple slits. Wavefronts are not shown.

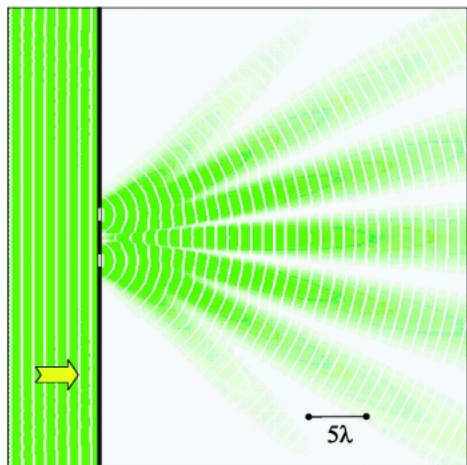


Fig. 7 Calculated diffraction pattern through double slits. Slit distance d is equal to $4a$. White lines show wavefronts.

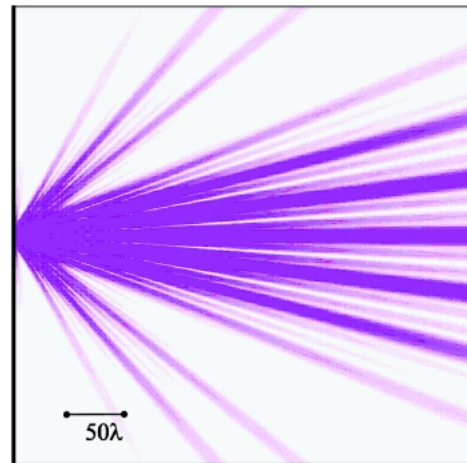


Fig. 9 Calculated diffraction pattern through quadruple slits. Wavelength of incident beam is half of that in Fig. 8.

d をおいて 2 つ並べた場合を考えます。この時、ピンホールの後方には Fig. 7 に示すような明暗の縞模様が Fig. 6 よりも明瞭に観察されます。明暗の強度変調は、2 つのピンホールから来た波の振幅を足し合わせたとき、強め合うか打ち消し合うかに対応しています。ここで、更にピンホールの数を 4 つに増やしてみましょう。すると、Fig. 8 のように干渉像は更にシャープになり、特定の方向に強め合います。多重ピンホールのせいであらぬ方向に明るい光が進んでいくわけですが、この現象も一種の回折です。回折光はスクリーンの中心 (0 次光) から遠ざかるにつれ ± 1 次光、 ± 2 次光…と番号が振られ、 m 次回折光の偏向角を θ とすると $\lambda = d/m \sin \theta$ と表されます。この回折光をきれいに分離して観測しようとする、 θ はある程度大きくて、しかも 90° より小さい必要があります。つまり、間隔 d と波長 λ があまりにかけ離れているとまずいわけで、これは実際の回折素子を考える上でとても重要です。

この例であげた多重ピンホールからの回折は、本稿の主題である分光に利用できます。Fig. 8 の配置において、ちょうど半分の波長の平面波が入射したときの回折光の強度分布を Fig. 9 に描きました。両者を比べると 0 次光以外の回折光は位置がずれているのがわかります。したがって、スクリーンの位置に回折光の幅と同程度の幅のスリットを置くことで、一定の波長幅 $\Delta\lambda$ に入った光のみ取り出すことができます。このとき波長分解能 (エネルギー分解能) は $\lambda/\Delta\lambda \sim mN$ と表されます。N は照射領域内のピンホールの数で、N が大きいほど分解能が高いことがわかります。ここで考察した多重ピンホールの拡張、透過型回折格子を利用した可視光のスペクトル分解を Fig. 10 に示しました。透過型回折格子とは、光を透過させることを前提として多重スリットを刻んだものです。スクリーンの真ん中にある 0 次光には虹が見られませんが、それ以外の次数の回折光には虹色が観測されています。従って、そこに適

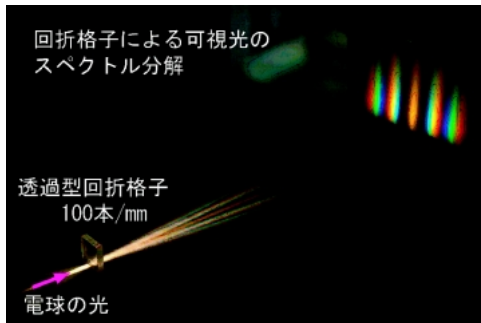


Fig. 10 Diffraction of visible light by a transmission grating.

当なスリットを置けば、色を切り出せることがお分かり頂けるでしょう。

ここでは、「①平面波入射」+「②多重ピンホール」+「③スリット」という系で構成される簡単な「分光器」を考えてみましたが、このセットの概念は放射光分光器を考える上でも非常に重要です。すなわち、①入射光はきれいな波（例えば平面波）とは限らないため、整えるために「前置光学系」を用いる、②分光素子で色の違いを角度の違いに変換する、③スリット等の「後置光学系」を用いて必要な色成分を切り取るという一連の手続きです。これを頭に入れておけば、放射光用分光器の基本構造を理解するのは難しくありません。ただし、常に全要素が必要というわけではなく、例えば i) 入射光がほぼ平面波とみなせるとき前置光学系 (①) を省略する場合がある、ii) 分光素子として完全結晶を用いた場合後置光学系 (③) を省略できる、といったヴァリエーションがあります。しかしながらいずれの場合も、②の分光素子を抜きにして分光器を構成することは不可能です。そこで次章では、どのような分光素子がどんな場合に用いられているか概観しましょう。

4. 分光素子—回折格子と完全結晶

回折を利用した分光法は、単純な幾何学をベースにしているため VUV から X 線に至るまで幅広く適用できるのが特長です。放射光用の分光素子としても、回折格子及び完全結晶が広く用いられています。前者は基板の上に多数の溝をきざんだもの、後者は 3 次元の格子点上に規則正しく原子を配列させたものです。回折格子と完全結晶は回折素子であるという共通点を持ちますが、詳しくみるといくつかの点で異なります。第一の違いは空間スケールです。前者はミクロンからサブミクロンの溝間隔を持つ（斜入射の場合実効的な最小溝間隔はナノメートルオーダー）のに対し、後者はオングストロームオーダーの格子定数を有します。従って前者は VUV から軟 X 線領域に用いられ、後者はより短波長の硬 X 線で用いられます。第二に幾何学的な違い（表面上の刻線 vs. 3 次元の格子）があげられます。平行・白色の光が入射した場合、前者は

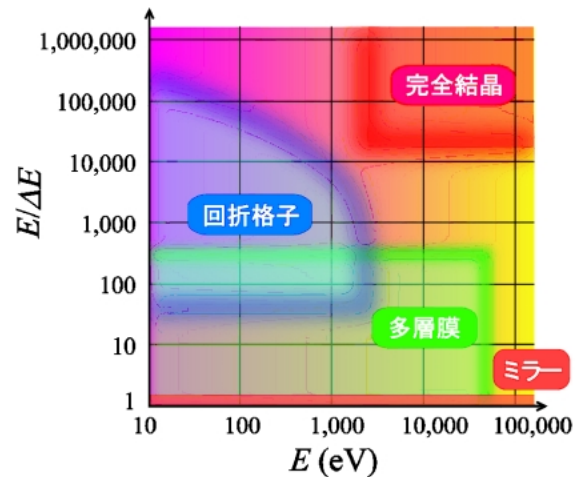


Fig. 11 Energy resolution map of optical elements.

全ての色を違う方向に出射するのに対し、後者はフィルターのように特定の波長領域内の光をある角度範囲に出射します（コラム参照）。したがって、前者は色をより分ける後置光学系が必須ですが、後者は必ずしもそうではありません。第三の相違点が分解能です。Fig. 11 に、横軸に光子エネルギー（波長）、縦軸に分解能をとって、回折格子と完全結晶のカバーする領域を示しました（一緒にミラーと多層膜も示してあります。それぞれ本シリーズ第7回及び文献2を参照して下さい）。分解能は、回折格子で数十から数万程度に対し、完全結晶は1万から1億にも達します。分解能を決める主因は、前章でみたように照射領域内にある刻線（格子面）の数です。したがって分解能を上げるには刻線数を増やす（高密度刻線または斜入射配置）、または回折に寄与する格子面の数を増やす（高次反射または非対称反射）といったことがなされます。しかしながら実際には刻線間隔（格子面間隔）の不均一性によって分解能は頭打ちとなります。回折格子では基板・刻線の加工技術が律しているのに対し、完全結晶では高品質の半導体結晶成長技術の結果をそのまま利用できるため容易に高分解能化が図れます。しかし、完全結晶では逆に1万を切るような低分解能を実現するのは難しく、この目的では主に多層膜が用いられます。第4の違いがスループットです。これは単色光が入射した場合の出射光強度と入射光強度の比を表しており、典型値としては回折格子の場合は数%~数10%、完全結晶では数10%~100%近くとなっています。

いずれにせよ重要なことは、測定対象とする事象にふさわしい分解能を選択する、ということです。分解能が足りないと高品位の計測ができないのは勿論ですが、不必要な高分解能は、はるばるやってきた光子の大部分を捨ててしまうこととなります。例として、光源と分光器のパラメータが与えられたときの分光後のフォトンフラックス（単位時間あたりの光子数）を計算してみましょう。光源の強度

としては「photons/sec/0.1% b.w.」という単位がよく使われます。「/0.1% b.w.」というのは、分解能1000 (= 0.1%)の分光器を通したときのフラックスという意味で、例えば、この値が 1×10^{14} 、分光器の分解能が10000、スルーputが0.8とすると、分光された光の強度は

$$1 \times 10^{14} \times 1000 / 10000 \times 0.8 = 8 \times 10^{12} \text{ photons/sec}$$

と求められます。

実際の放射光分光器は、分解能、スルーputに加えて操作性や安定性も考慮して様々な工夫がなされています。詳しくは第5回(硬X線)、第6回(軟X線・VUV)をご覧ください。

5. 知って得するビームラインの豆知識

まず、光の波長とエネルギーの関係は、現場でよく使われる単位で覚えておくことをお勧めします。Fig. 1にあるように、光のエネルギーはeVで表します。波長はナノテクなどのお陰でしょうか、推奨単位系であるnmで表現することが増えて来ました。が、それでも軟X線より短波長ではやはりÅがしばしば使われます(1nm=10Å)。eVとÅ単位でエネルギーと波長を表す場合、それぞれを掛け算すると約12,000(keVとÅでは約12)になります。例えば、炭素のK吸収端は約300eVですから40Å、窒素の場合は約400eVなので30Å、酸素は約500eVなので24Åといった具合です。この中でどれか一つでも正確に覚えておくとい良いでしょう。

次に大事なことは、ビームラインの外観と分光器の種類の関係でしょうか。硬X線を利用するビームラインの場合、分光器も実験ステーションもインターロック付きのハッチの中にありますので、軟X線より低エネルギーの光を扱うビームラインとは直ぐに見分けが付きまます。また、第5回で解説されるように、冷却や集光、或いは駆動機構などに違いはあるものの、分光器の種類としては、二枚組の完全結晶を利用した二結晶分光器にほぼ限定されます。一方、回折格子分光器の方は、回折格子の面形状や刻線の仕方(等間隔か不等間隔か)、駆動方式や光学素子の幾何学配置などに豊富な自由度があり、非常に多くの分光器の種類が存在します。反射率の関係から、凡そ40eV以下を直入射領域、それ以上を斜入射領域と呼び、反射型の回折格子を使った分光器もこれに応じて直入射型分光器と斜入射型分光器とに大別されます。ビームラインが途中で激しく折れ曲がり、真空パイプが逆向きに繋がっているようなら、直入射分光器のビームラインと考えてはほぼ間違いありません。(直角に曲がっているのは赤外のライン?) 回折格子の面形状には球面、或いは平面が多く用いられ、どんな形状を用いるかによって球面回折格子分光器(Spherical Grating Monochromator; SGM)や平面回折格子

分光器(Plane GM; PGM)などと呼称することがあります。

6. おわりに

放射光のエネルギーを切り出すための道具、分光器についてその基礎的な事項を中心に解説しました。光の波長の違いが物理的な現象の違いとしてどのような形で分光という過程に利用されているのか、その基礎を理解して頂ければ幸いです。引き続き第5回、6回では、結晶分光器を用いたビームラインと回折格子を用いたVUV・SX用の分光器について、実際に使われている分光器の技術的な問題点を含めた具体的な説明がなされることになっています。

放射光を提供する施設としては、光源性能の着実な向上を図ると共に、観測装置や分光器を含めたビームライン全体としての性能向上に努めることもまた非常に重要な任務です。そのために多大な努力が払われている現実についても利用者の方々にご理解頂ければ幸いです。また、これには、波長再現性や安定性の問題、或いは迷光や散乱光を低減するような非常に地道な努力も含まれます。これらビームラインの現状については、後続の章で触れられることでしょう。

ここで、第一回の車の例に準って個人的な見解を纏めてみます。通常、車の運転をするのに、トランスミッションの細かな仕組みを知っている必要はありません。しかし、それを正しく理解していると、車の運転を安全に楽しむことが出来ます。知っておいて損をする知識はありません。ミッションのみならず、エンジンやサスペンションなど車に関する専門知識を身につけ、更に己の運転技術を向上させようと努力する利用者が一人でも増えることを切に希望します。そのような利用者には、是非とも世界的なレースに参戦して頂きたいと思ひます。

最近、X線自由電子レーザー(FEL: Free Electron Laser)を目指した光源開発が世界各地で進められています³⁻⁵⁾。中でも、ドイツのDESY-TTFでは、既に30nmのSASE-FELの発振に成功し、種々の利用実験が行われているようです。SASEとは、Self-Amplified Spontaneous Emissionの略であり、長い直線加速器とアンジュレーターを用いた電子ビームからのレーザー発振です⁶⁾。従って、放射光とはその発生原理が異なります。また、直線加速器がベースとなりますので、円形加速器をベースとしてきた従来の放射光とは利用形態も大きく異なります。日本でも、理化学研究所のプロジェクトチームによるプロトタイプ建設が行われており⁵⁾、利用実験が予定されています。SASE-FEL以外に、ERL(Energy Recovery Linac)と呼ばれる直線加速器をベースとした光源が提案されています⁷⁾。これら新しい世代の光源は、4th generation light sources(4GLS)と呼ばれています。繰り返し周波数が低く、大強度・短パルス、かつコヒーレントなX線FELの

利用では、その特徴を活かして、種々の物質における機能発現のメカニズムを原子レベルで解明することが期待されています。

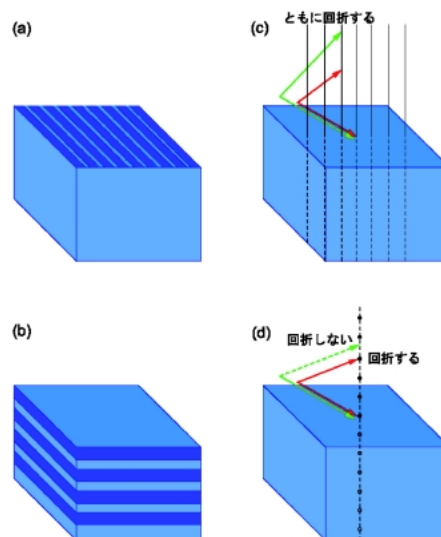
今後、皆さんも、いろいろな場面で X 線 FEL の話を見聞きされると思います。計画通りに開発が進めば、あと 5 年前後で利用研究に供されます。「ナノメートルの世界をフェムト秒で見る」がキーワードのようです。先行する諸外国の X 線 FEL 計画では、例えば、タンパク質単分子の構造解析や、分子の光解離反応などフェムト秒スケールで進行する超高速現象の実時間追跡、或いは強光子場によるクラスターのクーロン爆発など新しいサイエンスの可能性やそれを実現するための利用ビームラインが提案されています^{3,8)}。さて、他にどんな新しいサイエンスが飛び出してくるのか、非常に楽しみです。皆さんも自分の研究の発展として、どんな利用研究が考えられるか、ちょっと悩んでみませんか？ 良い提案が出来れば、人類が未だ手にしたことの無い究極の光が使えるかもしれませんよ。

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。

■コラム 逆空間における分光素子

本文中にあるように、分光素子として回折格子を用いるか、或いは結晶かによって取り出せるエネルギー範囲を大別することが出来ます。近年の技術発展に伴って、放射光業界では分業化が進んでいますが、ビームライン関連では主にこの分光素子の分類に依っています。つまり、VUV・軟 X 線か或いは硬 X 線かと言った具合です。しかしながら、お互いがブラックボックス化するのは良いことではありません。ここでは、共通言語としてエワルドの逆空間を用いて、回折格子と 3 次元結晶の幾何的な違いが分光の機能にどのように影響するのかを考えましょう。まず、**Fig. (a) (b)** にそれぞれ実空間における回折格子・結晶のモデルを表します (簡単のために、後者は表面に平行な格子面のみ考えています)。逆空間での表現は、両者をフーリエ変換することによりそれぞれ **Fig. (c) (d)** のように与えられます。回折格子の場合は直線 (逆格子ロッド) で構成されるのに対し、結晶の場合は点 (逆格子点) から成り立ちます。



これらに白色・平行な光が入射した場合の回折条件を考えます。エワルドの作図法によると、回折光は **Fig. (c) (d)** の上向き矢印のように与えられます。回折格子の場合、回折光のベクトルの終点は逆格子ロッドの上を連続的に移動できるため、白色光が入射しても連続的に回折条件を満たします。つまり回折光は虹のように連続的な色分布を示します。これに対し、結晶の場合は、特定の波長のみしか回折を起こさず、離散的 (ラウエ斑点) になります。分光素子として用いた場合、前者は空間的に色をより分けるための後置光学系が必須であるのに対し、後者はそうではありません。結果としてビームラインのデザインにも大きな違いが生じることになります。

参考文献

ここで紹介した光学に関する基礎については次の文献を参考にしました。

- 1) E. Hecht 著 (尾崎義治・朝倉利光 訳)「ヘクト 光学 I」及び「ヘクト 光学 II」(2003年丸善)
- 2) 波岡 武, 山下広順編「X 線結像光学」(1999年培風館) 次世代光源についての詳細は以下をご参照下さい。
- 3) 米国; <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>, 最初に実施すべき利用研究の提案に関しては, <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-611.html>.
- 4) 独国; <http://xfel.desy.de/>
- 5) 日本; <http://www-xfel.spring8.or.jp/>
- 6) 新竹 積: 放射光 18, No. 1 (2005).
- 7) 例えば, 米国; <http://erl.chess.cornell.edu/>, 英国; <http://www.4gls.ac.uk/>, 日本; http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/studyreport1/index.html
- 8) http://tesla.desy.de/new_pages/TDR_CD/PartV/xfel.pdf