

連載 (講義)

電子光学入門

— 電子分光装置の理解のために —

(第10回)

嘉藤 誠

日本電子(株) 〒196-8558 東京都昭島市武蔵野 3-1-2

kato@jeol.co.jp

(2007年10月15日受理)

電子分光装置において、インプットレンズ系によって電子を減速させてからアナライザに取り込むことで、エネルギー分解能を向上させることができます。電子ビームの減速は一般には感度の低下を伴い、これは輝度法則によって説明がなされます。しかし、分析の対象が点光源である場合、輝度の概念は意味を失い、かわりにインプットレンズ系の球面収差が感度を支配します。今回は、分解能と感度の減速率依存性、およびその光源サイズによる違いに関して議論します。

Introduction to Electron Optics for the Study of Energy Analyzing Systems (10)

M. Kato

JEOL Ltd., 3-1-2 Musashino, Akishima, Tokyo 196-8558.

kato@jeol.co.jp

(Received: October 15, 2007)

In electron spectrometers, retardation of electrons by an input lens system is a standard technique for improving energy resolution. The effect of the retardation is explained with reference to the law of brightness, which shows how the sensitivity is changed according to the retardation. However, the concept of brightness loses its meaning if a source is assumed to be a point. In such a situation, the sensitivity is governed by the amount of spherical aberration of a lens system. The dependence of resolution and sensitivity on retardation and the effect of the size of a source are discussed in detail in this chapter.

10 電子分光系の分解能と感度

10.1 はじめに

電子分光のために用いられるエネルギーアナライザの動作について、前回述べました。今回議論するのは、そのようなアナライザを構成要素として含む電子分光装置の性質です。

アナライザがほかの光学要素と組み合わせて用い

られる系においては、アナライザ単体の分解能や感度に関しての性質は、電子分光装置の特性をそのまま決定するものではありません。たとえば、試料とアナライザの間に、インプットレンズと呼ばれるものを挿入することがしばしば行われます。このレンズによって、分析したい電子をあらかじめ減速させてからアナライザに入射させれば、分解能が向上します。しかしその見返りとして、減速は一般に感度の低下を伴います。これは、第8章で述べた輝度の法則によるものです。電子ビームの輝度は減速が強いほど減少し、これによって感度が低下してしまいます。

しかしながら、輝度の法則はあくまで面光源に対してのものです。光源のサイズが点と見なされるほど小さければ、輝度法則の制約を受けることはありません。そこで、少なくとも原理上は、減速によって感度が落ちる必然性はないのです。この事実によって、光源のサイズというものが、分光系の特性に本質的な影響を与えることが理解されます。

表面分析のための電子分光法において、分析対象となる光源のサイズを大まかに分類すると、点光源、一様に広がった面光源、そしてそれらの中間の場合が考えられます。たとえば、オージェ電子分光法 (Auger Electron Spectroscopy: AES) においては、試料面で一次電子ビームが細く絞られるので、オージェ電子の発生領域は近似的に点と見なされます。一方、X線光電子分光法 (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS) において、X線を試料面に広く照射すると、光電子の発生領域は面光源として働きます。あるいは同じXPSでも、視野を制限する分析モードにおいては、光電子の発生面積がなんらかの方法で限定されます。しかしそれでも、その際の分析領域は点光源と見なせるほど狭くはありません。

電子分光系において、分解能と感度、減速率、光源のサイズはたがいに深く関連していて、切り離して議論することはできません。これらの関連を詳しく調べることで、分光系の特性を明らかにすることを今回の目標とします。

10.2 CHA を用いた分光系の動作

10.2.1 分光系の構成

本章を通して、アナライザの具体的な動作は、前回解析した静電同心球アナライザ (Concentric Hemispherical Analyzer: CHA) に対して示します。ただし、アナライザを他のタイプのものに置きかえた場合も考察できるように、アナライザの分散係数と開口収差係数をそれぞれ C_E と C_A と記して、具体的な計算を行う段階でCHAに対する値を適用するようにします。

CHA をアナライザとして採用した場合の、表面分析のための電子分光系の構成例を Fig.1 に示します。これは、試料から出た電子をまずインプットレンズで取り込み、このレンズ中で減速を行ってから CHA に導く系です。

歴史的に、CHA が応用された初期の段階においては、CHA の入口に直接試料を置くことが行われま

した。しかし、それでは減速ができないだけでなく、試料周辺が窮屈になります。電子を CHA まで輸送することで試料周りの自由度を増やすことが、インプットレンズの役割の一つです。

このような系を考察することは、表面分析のための装置に限らず、一般にアナライザを含んだ電子光学系の理解のために必要です。たとえば、各種の電子顕微鏡にアナライザを導入することでエネルギー分析が行われ、あるいは、特定のエネルギーの電子だけで結像させるような装置もあります。そのような系に対して、レンズとアナライザを単純に組み合わせた Fig.1 のような構成が、まず基本形として理解されなければなりません。

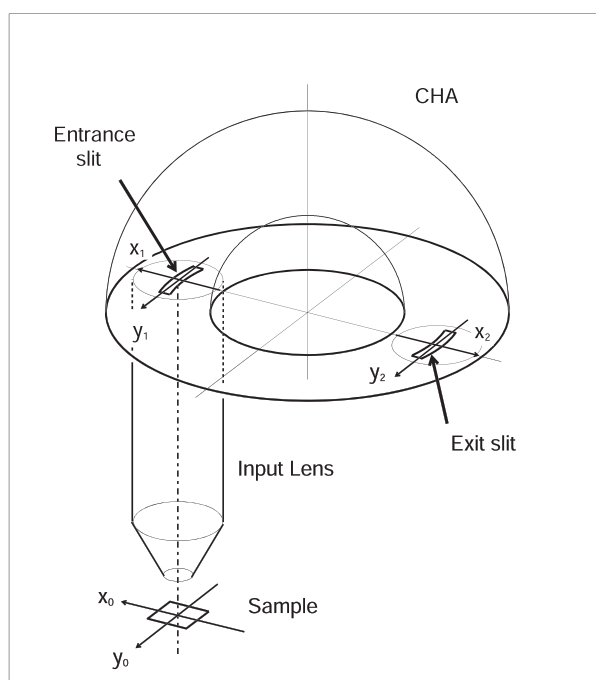


Fig. 1: Schematic diagram of an energy analyzing system consisting of an input lens system and CHA.

さて、Fig.1 に示されているように、CHA の入口には電子ビームを制限するための入射スリットが置かれます。入射スリットから CHA に入った電子は、球対称電場によって分散作用を受け、出射スリットの面上でエネルギー分布を反映した分散像をつくります。

エネルギースペクトルを得るには、出射スリットのうしろに検出器をおいて、電場強度を掃引しながら電流値を計測します。あるいは、出射面にイメージングプレートのようなものをおいて、分散像を直接記録する方法でもよいわけです。

いつも Fig.1 のような図を描くのは大変なので、通常は Fig.2 のように、CHA の中心軌道を直線に引き

伸ばして描き、この直線を光軸として見て z 軸とします。エネルギー分散方向を x 軸、それに直交する方向を y 軸とします。以下では試料面を $z = z_0$ 、CHAの入射面を z_1 、出射面を z_2 と約束します。

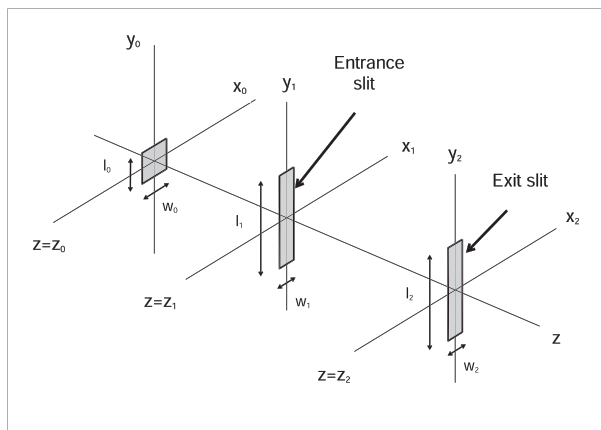


Fig. 2: Coordinate system in which the optic axis of the CHA is drawn as a straight line.

CHAの二つのスリットは、通常は中心軌道の曲率半径で湾曲させますが、この図ではまっすぐな形状で近似しています。(あるいは、湾曲した方向に y 軸をとったと考えてもよいでしょう。) 入射スリットの x 方向の幅を w_1 、 y 方向の幅を l_1 とします。出射スリットについても同様です。試料面上で矩形領域を考える際は、 w_0 と l_0 で指定します。

電子軌道が光軸となす角は、 x 方向に α 、 y 方向に β とします。試料上の一点から電子が放出される場合のビームの開き角は、 $(\alpha_{om}, \beta_{om})$ という組で指定することができます。ここで添え字の m は最大値であることを示します。これらの角度の意味を Fig.3 に示します。

10.2.2 分光系としての動作

分光系においては一般に、アナライザの分散方向 (x 方向) におけるビームの広がり、エネルギー分解能を左右します。高い分解能が要求されるほど、この方向にビームをきびしく制限しなければなりません。単にビームを制限するだけなら簡単ですが、これは当然ながら感度の低下を伴います。

分光系の動作条件は、つねに分解能と感度との妥協によって決定されます。多くの場合、分解能だけ、あるいは感度だけの議論はほとんど無意味です。以下の節では、両者の相対する関係が繰り返し現れることになるでしょう。

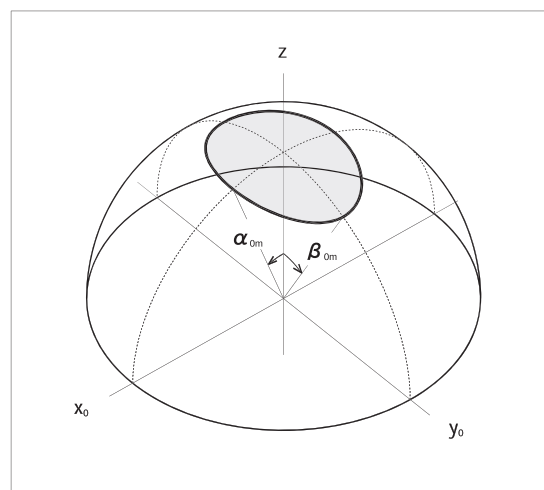


Fig. 3: Emission angles of an electron beam on a sample plane.

さて、分散方向に直交する y 方向では、ビームがどんなに広がっても分解能とは無関係であり、この方向にビームを積極的に制限する理由は存在しません。この方向に長くのびた検出器を用いるのであれば、ビーム自体は広がったままでもよいわけです。しかしもちろん、検出器の大きさには限度があり、なるべく小さなサイズで済むにこしたことはありません。 y 方向の軌道は、単にアナライザに入射した角度のまま広がってしまうのではなく、ある程度は集束されるのが望ましいことになります。

CHAは、 y 方向に関しては理想的な性質を持っています。すなわち、CHAは y 方向も x 方向と同じくレンズ作用をもち、しかも y 方向にはまったく収差がありません。(この理由は § 10.2.3 で説明します。)

このような事情によって、CHAを動作させる際の x 方向と y 方向のビームの様子は、かなり異なるとのようになります。Fig.4は、その状況を示します。

Fig.4(a)は、CHAの入射面から出射面までの zx 面上において、電子軌道が分散を受けている様子を示しています。検出面 $z = z_2$ におけるビームの幅 d_2 は、もし開口収差がなければ、入射スリット幅 w_1 に一致します。つまり、入射面に光源がおかれていると考えたときの、その倍率 -1 の像 (すなわち倒立像) が出射面に写ります。実際には開口収差があるので、これによる像のボケが付け加わり、一般には $d_2 > w_1$ となります。

よい分解能が実現されるためには、入射ビーム幅 w_1 が小さく制限されるだけでなく、収差によるボケを抑えるために入射角も制限される必要があります。このために、たとえばインプットレンズ内の適当な位置

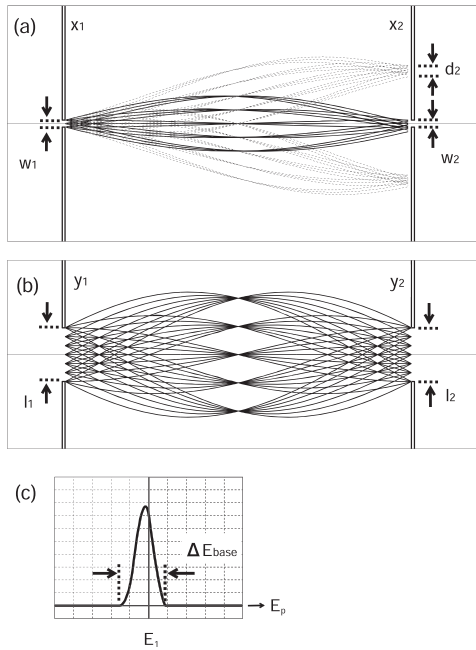


Fig. 4: Electron trajectories in an energy dispersion direction (a) and y direction (b) of the CHA. Energy spectrum for a monochromatic source (c) is also shown.

にスリットを置くことが行われます。あるいは、CHAの電場の内部に、電場分布を乱さないように入射角制限の機構を置くことも可能です。(図ではこの機構は示していません。)

図(b)は、 zy 平面上の軌道の様子です。出射面には、入射面の倍率 -1 の像が形成されます。この方向には収差がないので、入射角 β_1 がいくら大きくてもこの像がボケることはなく、入射スリット幅 l_1 と入射角に比例して感度が増加していきます。収差によるボケがないことから、出射スリット幅 l_2 は、入射スリット幅 l_1 と同じ値に設定されます。

なお、 x 方向のスリット幅に関しても、通常は $w_1 = w_2$ とします。 x 方向には収差があるので、このようにする理由は自明ではありません。この条件は、感度に関しての最適化の計算によって初めて導かれるものです。(§10.4.4で示します。)

さて、エネルギースペクトルを得る際は、CHAの電場強度を掃引して、パスエネルギー E_p を徐々に大きくしていきます。入射するビームのエネルギーが E_1 で単色であったとすれば、 E_p が E_1 に近づくにつれて、ビームが図(a)の上方向から降りてきて、出射スリット位置を通り過ぎていきます。その際の検出器の電流出力をプロットすれば、図(c)のようなスペクトルが得られます。

単色ビームに対してのスペクトルは、 $E_p = E_1$ で

ピークをもち、その他の E_p では0であるような、デルタ関数のような形状となるべきです。しかし、ビームは検出面で d_2 という有限の幅をもち、かつ出射スリットの幅 w_2 も有限ですから、スペクトルはある幅 ΔE をもたざるをえません。これがこの分光系の絶対分解能であり、 $\Delta E/E_p$ が相対分解能です。

本章を通じて、エネルギースペクトルの幅は、図(c)に示されているような、ベースで評価した値 ΔE_{base} で与えます。実用的には半値幅で定義した値 ΔE_{FWHM} を用いるほうがよいのですが、これは検出面でのビームの電流密度分布が知れないと計算できません。一方 ΔE_{base} は、いまの場合ならビームの幅 d_2 と出射スリット幅 w_2 だけで決まるので、計算が楽です。幸いにして、通常は $\Delta E_{base} \simeq 2\Delta E_{FWHM}$ であり、この関係から大きくそれることはありません。

なお、スペクトルのピークに対応する E_p は、本来は E_1 に一致すべきですが、図では僅かにずれています。これは出射面におけるビームパターンの非対称性によるものであり、開口収差が2次であることに由来します。

スペクトルの横幅が分解能を示すのに対して、ピークの高さは、分光系としての感度を反映するものです。分解能が一定の条件のもとでは、このピーク値が大きい装置ほど感度が高いということが出来ます。ただし感度とは、光源強度とは無関係に、装置自身を特徴づける量でなければなりません。そこで、感度の定義には少し工夫が必要です。これに関しては§10.3であらためて議論します。

単色光源に対してのスペクトルは、分光系の動作を完全に特徴づけるものです。これはエネルギーに関しての系のインパルス応答であり、分解能関数(Resolution Function)と呼ばれます。(この関数は、文献によっては「Spectrometer Function」, 「Instrumental Function」, 「line-shape」などと呼ばれています。)

装置によって実測されるスペクトルは、測定対象である真のスペクトルと分解能関数とのコンボリューションとなります。この場合は分解能関数の形だけが問題となり、ピーク値は適当に規格化して用いられます。一方、本章においては、この関数の幅を分解能と見るだけでなく、ピーク値を感度に対応づけます。そこで、「分解能関数」という呼び方とは若干ニュアンスが異なってきます。

10.2.3 CHA の対称性と結像作用

CHA が y 方向に結像作用をもち、しかもこの方向に収差がない理由を述べます。これは単純に、電場が球対称であることからの帰結です。

まず Fig.5(a) のように、両スリットの中央を通る面と、それを半球の中心に対してある角度だけ回転した面を考えます。これらの面は、両スリットの y 方向の端の場の乱れを無視すれば、完全に対等です。そこで、図の点 O_1 から出た軌道が O_2 に達するのであれば、 P_1 から出た軌道は P_2 に達することになります。

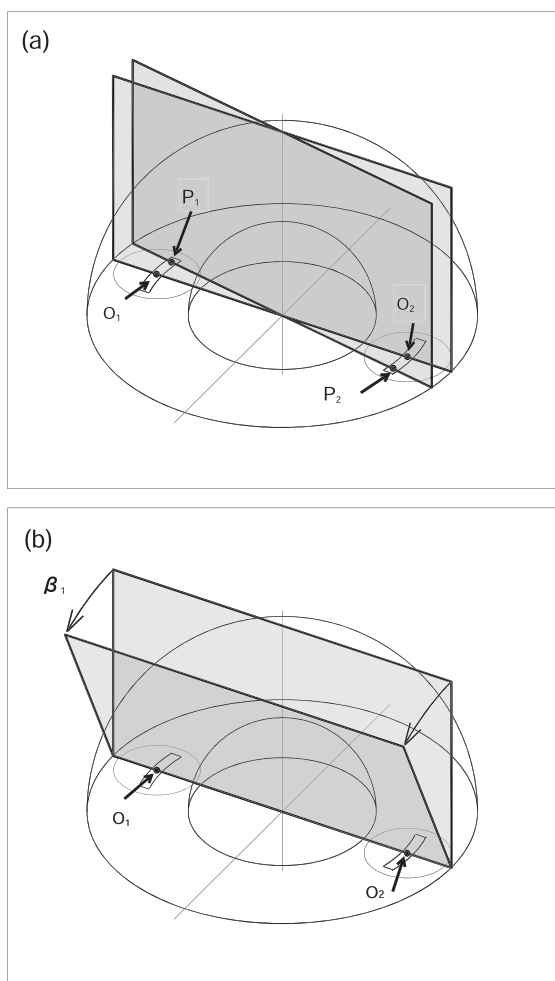


Fig. 5: Absence of the aberration of a CHA is ascribed to the spherical symmetry of the electric field: on the aberration (a) for an incident position; (b) for an angle β_1 .

また、図 (b) のように角度 β_1 だけ傾いた面を考えても、やはり球対称性によって、もとの面と対等です。したがって、 O_1 から入った軌道は、 y 方向入射角 β_1 がどんなに大きくても O_2 に達することがいえます。

これら二つの図から、(スリットの湾曲にそって定義した) y 軸方向に結像作用があり、しかも入射角 β_1 についての収差が存在しないことが結論されます。 x 方向にはもともと結像作用があることがわかっているので、結局 CHA の入射面と出射面は共役となり、入り口と等倍の像が出口に形成されます。この像は、開口収差による x 方向の収差だけをこうむります。

ここまでの議論は、半球のつくる電場の球対称性を用いています。しかし実際には、前回述べたように、フリッジ部分の場の乱れが存在するわけです。Fig.5(a) における議論は、スリットが円周に沿って 360° にわたって切られていればやはり成立しますが、図の (b) はそうはいきません。

Fig.5(b) において、フリッジ場まで考慮したときのレイトレースの計算結果を Fig.6 に示します。これからわかるように、入射角 β_1 が 70° くらいから軌道がそれはじめます。これは、 β_1 が大きいほどフリッジ領域に滞在する時間が増え (フリッジ場を斜めに通過するので)、そのぶん受ける影響も大きくなるからです。

入口部分において電場の偏向力が理想場より弱まる結果として、入射したビームはまず外球側にそれ、その結果として余分に強いレンズ作用を受けることで、今度は内側に強く振り戻されます。そこで、この作用が強いと外球か内球にぶつかり、あるいはそうでなくても出射スリットに入ることができなくなります。

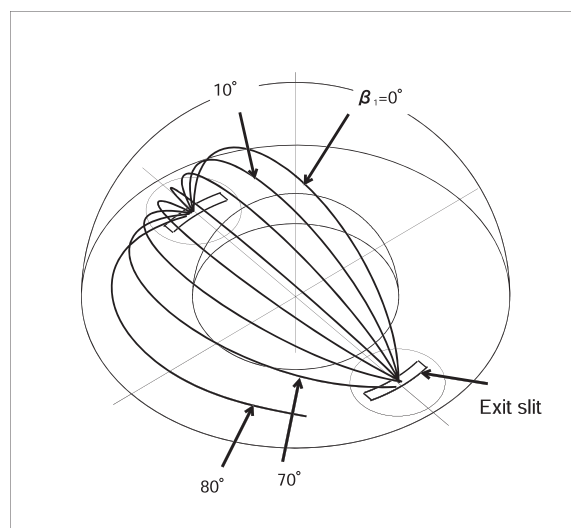


Fig. 6: Electron trajectories in the CHA calculated by the ray-tracing. The effect of a fringing field becomes larger with increasing incident angle β_1 .

インプットレンズを用いる場合には、このような大

きな角度でCHAに入射するような電子はあまり存在しません。なぜなら、インプットレンズによる制限が強いために、そのような大きな角度をもって入射スリット面に達する電子の数は限られてくるからです。

とは言え、 y 方向にはビームは積極的な制限がなされることがないので、この方向の電子の取り込み効率が系の感度に大きく影響してもおかしくありません。 y 方向の感度は、分光系において定量的な評価の難しい部分です。これに関しては後の節で議論します。

10.3 分光系の感度の定義

分光系のエネルギー分解能は理解しやすい概念ですが、分光系の感度、あるいは「明るさ」に関しては、これが何を意味するかが自明ではありません。ここでは感度の定義に関して述べ、具体的な定式化は§10.4以降で行います。なお、アナライザはCHAとは限らずに、一般にアナライザにインプットレンズを付加した分光系で考えます。

10.3.1 面光源の場合

まず面光源に対しての感度の定義を行います。本章において単に面光源という場合、試料面において、電子がすべての点から全方位に一律に放出されている状況を考えます。

すでに§10.2.2で触れたように、分光系の感度とは、装置自身の性能を示すものであるべきです。感度を、単色光源に対してのスペクトルのピーク値に対応させたいわけですが、しかしそのピーク値自体は、電子源の強度で変わってしまいます。

そこで、分光系の感度を、試料面における電子の取り込み面積と取り込み角として与えることが考えられます。光源の輝度（すなわち単位面積、単位立体角あたりの放出電流量）がいくらであっても、分光系に入射する電子量は、取り込み面積と取り込み立体角に比例することには間違いありません。

ここで問題となるのは、「取り込み面積」と「取り込み角」の意味です。試料から分光系に入ることのできる電子のすべてが、感度に対応するものではありません。いくらたくさん電子が入射しても、それが最終的に信号として寄与しなければ意味がないわけです。感度を定義する取り込み面積と取り込み角は、「スペクトルのピーク値に寄与するような電子の初期条件」に正しく対応しなければなりません。

すでにCHAに関して見たように、要求される分解能がよくなればなるほど、分散方向におけるビームはアナライザ入り口できびしく制限されます。そこで、分散方向に関する限りは、入射量を規定するのは電子を最初に取り込むインプットレンズではなく、アナライザの側であるはずで。

Fig.7に示す系において、要求される分解能の値があらかじめ指示されているとしましょう。この場合、まずアナライザ入り口において、所定の分解能が達成されるためのビームの制限が決められます。すなわち、入射スリット幅 w_1 で決まる x_1 方向の制限、および入射角制限 α_{1m} です。

このときの、アナライザ入り口でのビームの制限は、エミッタンス図として示すことができます。すなわち、図に描かれているように、 $x_1\alpha_1$ 平面上の領域として表示します。このエミッタンス図が、所定の分解能を実現するための、入射ビームの制限のされ方を表します。

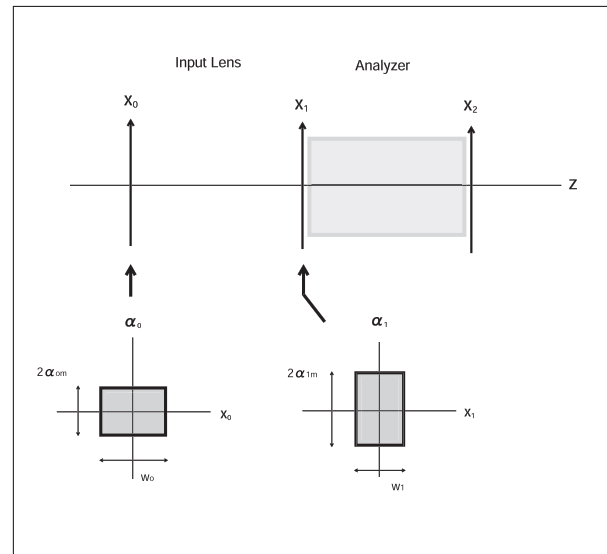


Fig. 7: Emittance diagrams of an electron beam at a sample plane and the entrance of an energy analyzer.

アナライザの入り口においては、エミッタンス図そのものではなく、その面積としてのエミッタンスが重要です。なぜなら、インプットレンズを介せば、エミッタンス図の形状はいかようにでも変えられるからです。しかしその面積の変化は、レンズによる加減速の比率だけで決まってしまいます。この変化のし方を支配するのが、輝度法則です。

簡単のために、インプットレンズ中で正味の加減速が行われない場合を考えましょう。このときは、アナライザ入り口でのエミッタンス図を試料面に戻せば、

形状そのものはレンズの働きでいろいろ変わるにせよ、面積は不変に保たれます。これがいわゆる輝度不変の法則です。これによって、試料面における空間幅 w_o と角度幅 $2\alpha_{om}$ の積としてのエミッタンスは一意に決定されます。

このことから、分散方向 (x 方向) に限定して考えた分光系の感度というものを、

$$G_x = 2w_o\alpha_{om} \quad (1)$$

で定義することができます。これは試料面における取り込み量として表されていて、所定の分解能に対応して定められるはずのものです。

うるさくいえば、上式の G_x はあくまでアナライザに入ることの許される電子量に対応するものであり、それがすべてスペクトルのピーク値に寄与するとは限りません。たとえば §10.2.2 の Fig.4(a) の状況においては、アナライザ出射面でのビームの幅 d_2 が出射スリット幅 w_2 より大きいので、入射した電子が一度に全部検出器に入ることはあり得ません。

アナライザへの電子の入射量と、一度に検出される量との比は、**透過率** (transmission) と呼ばれます。この呼び方は「アナライザの性能を示す量」というニュアンスがありますが、しかし実際は、スリット幅などの動作条件の選び方でどうにでもなる量です。また、透過率が高いほどよい動作条件というわけでもありません。(アナライザや分光系の感度のことを大雑把に透過率とよぶ場合もあり、文献によって定義は一定しません。特に、あとで導入する透過関数と混同しないように注意が必要です。)

アナライザの透過率を考慮したうえで、スペクトルのピーク値に寄与するような電子の初期条件を決めて、 $x_o\alpha_o$ 面で張る面積を求めれば、それが系の感度を与えます。もし透過率が無視できる場合は (透過率が1に近い場合)、アナライザに入ることの許される電子の初期条件から、感度が決められます。どちらにせよ、感度と呼ばれるべきものが、試料面におけるエミッタンスとして (1) のかたちで表現されることに異論はないでしょう。

分散方向に直交する y 方向でも、感度の表式は、(1) に対応して次のように与えることができます。

$$G_y = 2l_o\beta_{om} \quad (2)$$

この方向においては、指定された分解能を達成するためにビームが制限される必要はありません。エミッタンスが制約を受けるとすれば、それはアナライザ

ではなくインプットレンズによってです。そこで、アナライザから逆行して試料面でのエミッタンスを決めるのではなく、インプットレンズ自身の性能によって、この方向の感度が決定されなければなりません。このように、分散方向とそれに直交する方向で、感度に関しての考察のされ方はまったく異なってきます。

以上においては、 x 方向と y 方向に分けて感度の表式を考えましたが、 G_x と G_y の積が、最終的に感度と呼ばれるべきものです。ここでは、次の量を感度 G として定義します。

$$G = \frac{1}{2\pi} G_x G_y = \frac{2}{\pi} w_o l_o \alpha_{om} \beta_{om} \quad (3)$$

最初の $1/2\pi$ という因子は、半球の張る立体角 2π との比率を考えるためにつけています。これに関しては §10.3.2 で説明します。

上式は、 $(x_o, y_o, \alpha_o, \beta_o)$ を座標とする4次元空間の体積としてのエミッタンスを与えています。しかし、これを分光系の受け入れの広さとして見るなら、分光系の**アクセプタンス** (Acceptance) とよぶほうが適当でしょう。(一般にエミッタンスとよぶかアクセプタンスとよぶかは見方の違いであって、本質的な差はありません。)

電子分光の文献では、 G は「étendue」あるいは「luminosity」と呼ばれることがあります。 G は光源の性質を示すものではないので、測光学における輝度 (brightness, luminance) とか照度 (illumination) という概念に対応するものではないことに注意しましょう。

10.3.2 点光源の場合

試料面に点光源が置かれた場合を考えましょう。点光源は試料面で空間的な広がりをもたないので、感度は試料面におけるエミッタンスではなく、取り込み角のみで表現されることになります。

面光源と同じ Fig.7 のような考え方は、点光源に対しては通用しません。なぜなら、点光源に対して $x_o\alpha_o$ 面において描いたミッタンス図は面積のない直線となり、したがって面積に関する輝度法則の制約を受けないからです。

もちろん、点光源とはいっても、現実には空間的にまったく広がりがありません。エミッタンス図は厳密に言えば有限の面積をもち、その面積は輝度法則に従います。しかし、その面積がたとえばアナライザの受け入れ可能なエミッタンスにくらべて十分小さければ、インプットレンズによってどんな変形を受けようとも、アナライザにとって有限な面

積をもつ図形として見えることはありません。アナライザ入り口でのエミッタンス図は、幅のない直線（インプットレンズの収差の寄与があれば曲線）と見なされます。

このことから、点光源に対しては、アナライザから試料面に逆行して感度を決定することができません。そこで、面光源の場合とは異なったアプローチが要求されることになります。

点光源に対して、所定の分解能に対応する取り込み角が知れたとします。すでに Fig.3 で示したように、取り込み角は $(\alpha_{om}, \beta_{om})$ という角度の組によって与えられます。この二つの角度で張られる立体角は $\Omega_o \simeq (2\alpha_{om})(2\beta_{om})$ となり、半球が張る立体角 2π に対しての Ω_o の比率として、次の量 T が決まります。

$$T = \frac{\Omega_o}{2\pi} = \frac{2}{\pi} \alpha_{om} \beta_{om} \quad (4)$$

T は分光系の透過関数 (transmission function) と呼ばれ、点光源に対しての感度の定義としてよく用いられる量です。(半球ではなく球全体の立体角 4π で割る流儀もあります。) 面光源に対しての G も同様ですが、 T は分光系のさまざまな動作条件に依存する複雑な関数となります。

点光源に対しても、 zx 面上および zy 面上の軌道に関しての感度を定義しておくとう便利です。このために、上で定義した T を x 方向と y 方向に分けて、

$$\begin{cases} T_x = 2\alpha_{om} \\ T_y = 2\beta_{om} \end{cases} \quad (5)$$

を定義しておきます。これらは、それぞれの方向の取り込み角の幅（全角）を与えます。(4) はこれらを用いて、

$$T = \frac{1}{2\pi} T_x T_y \quad (6)$$

として与えられます。

10.4 アナライザの分解能と感度

アナライザ単体の分解能と感度について、前回 (§ 9) は概略のみを述べました。このテーマに関しての厳密な定式化をここで行います。ただし、本節 § 10.4 では面光源の場合だけを扱い、また分散方向における議論を中心にします。点光源の場合、あるいは y 方向まで含めた議論のためにはインプットレンズの考慮が必要であり、これは § 10.5 以降で詳しく議論します。

10.4.1 分解能の表式

アナライザの入り口にエネルギー E_1 の単色の面光源が置かれていて、これが入射スリットによって x 方向に w_1 の幅に制限されているとします。その各点から放出される電子の出射角は、なんらかの方法で最大値が α_{1m} に制限されていると仮定します。

この状況は、CHA に関してすでに Fig.4 で示したものです。この場合の出射スリット面におけるビーム幅 d_2 は、開口収差によってつくられるボケの寄与を含みます。2次の開口収差をもつアナライザでは、このボケは各像点から決まった方向に延びるので、収差のないときの像の大きさ w_1 に、ボケの大きさ $C_A \alpha_{1m}^2$ を加えれば、それが d_2 を与えます。すなわち次式のようにになります。

$$d_2 = w_1 + C_A \alpha_{1m}^2 \quad (7)$$

CHA の場合は、2次の開口収差係数は $C_A = 2r_0$ で与えられます。ここで r_0 は CHA の中心軌道半径です。(C_A は正式には負の量として扱うべきですが、分解能の定式化の際には絶対値だけを問題とします。)

Fig.8 は、アナライザのパスエネルギー E_p を掃引する過程において、ビームがぎりぎり出射スリット内に顔を出した状態と、完全に姿を消した状態を示しています。電子が少しでも出射スリット内に入る間は電流が検出されるので、図の二つの状態に対応する E_p の差が、ベースで定義した絶対分解能 ΔE_{base} を与えます。

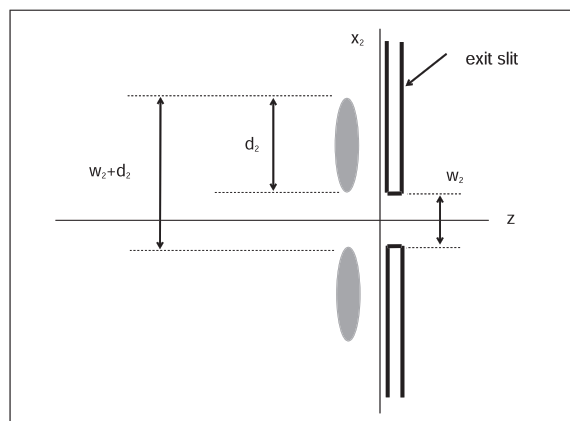


Fig. 8: Energy resolution is determined by a beam width d_2 at the exit plane of an analyzer and the width of an exit slit w_2 .

図における二つのビームは、 x_2 座標で $w_2 + d_2$ だけ移動する前後の状態であり、この距離をエネルギー

差に換算したものが ΔE_{base} となります。前回述べたように、エネルギーの差を位置の差に変換することがアナライザの働きです。その作用の大きさが、分散係数 C_E で与えられます。すなわち、エネルギー分散の距離は次式で与えられます。

$$\Delta x_2 = C_E \frac{\Delta E}{E_p} \quad (8)$$

ここで C_E は、CHA では $C_E = 2r_0$ です。

(8) を用いれば、分散面における $w_2 + d_2$ という距離をエネルギー幅に換算することができます。(8) における Δx_2 として $w_2 + d_2$ を代入すれば、相対分解能として次式が得られます。

$$R_{base} = \frac{\Delta E_{base}}{E_p} = \frac{w_2 + d_2}{C_E} \quad (9)$$

あるいは (7) を代入すれば、

$$R_{base} = \frac{w_1 + w_2 + C_A \alpha_{1m}^2}{C_E} \quad (10)$$

となります。これが、面光源に対してのアナライザの分解能を与える公式です。CHA の場合に、 $C_A = C_E = 2r_0$ を入れれば文献でよく見る表式となります。

なお、分解能の表式を導くにあたって、上とは別の考え方もあります。現実にはスペクトルを測定する際は、アナライザに入射してくる電子は単色ではありません。アナライザの E_p を固定したとすると、そのときに検出される信号は、あるエネルギー幅をともなった電子からつくられます。このエネルギーの不確定さの幅が ΔE_{base} であると考えられることもできます。

この立場では、Fig.8 に描かれている二つのビームは、 E_p を止めたときに射出スリットに入ることでできるエネルギーの最大値と最小値に対応すると考えられます。このような解釈のもとで、上と同じ表式 (10) が導かれます。このときの ΔE_{base} は、エネルギーの窓 (energy-window) としての意味をもちます。

しかし、そのように複数のエネルギーを考慮するよりも、単色光源を扱うほうが楽です。分光系の評価は、単色光源に対する議論によって本質的に尽くされています。

10.4.2 分解能と感度の対応

アナライザの分解能の表式は前項 §10.4.1 で得られましたが、分解能と感度の対応を知ることが実用上重要です。

前項で議論した系において、測定時に調整の可能な装置パラメタとして、入射スリット幅 w_1 、射出スリット幅 w_2 、および入射角の最大値 α_{1m} があります。そこで、 (w_1, w_2, α_{1m}) という値の組によって「動作条件」が指定されると考えることができます。この動作条件の選び方によって、分解能と感度がどのように変わるかを調べてみましょう。

まず、以下の議論を簡単にするために、 $w_1 = w_2$ という条件を置くことにします。のちの §10.4.4 において感度に関しての最適化を行う際に、この条件が正当化されます。本項では、この結果を先取りして使ってしまう、 $w_1 = w_2$ を用いて w_2 を消去することにします。

この条件のもとで、分解能と感度は次のように与えられます。(R_{base} の base という添え字は以下では省略します。)

$$\begin{cases} R = \frac{2w_1 + C_A \alpha_{1m}^2}{C_E} \\ G_x = 2w_1 \alpha_{1m} \end{cases} \quad (11)$$

この第2式は、アナライザの透過率を考慮しない場合、つまりアナライザに入射が許された電子をそのまま感度に結びつける立場です。透過率を考慮すると数式による議論が行えなくなるので、しばらく上式のもとで考えます。

アナライザの分解能 R と、 x 方向で定義した感度 G_x に関しては、(11) の二式によってすべて尽きています。すなわち、動作条件 (w_1, α_{1m}) を変えたときに、 R と G_x がどう変わるかが (11) によって与えられます。

もし、 R と G_x の関係を直接一つの式として与えることができれば、より便利であるはずですが、しかしながら、そのような表式は (11) から導くことはできません。(11) が与える R と G_x は、ともに w_1 と α_{1m} に関しての二変数関数です。 R は、 $2w_1 + C_A \alpha_{1m}^2$ さえ同じであれば同じ値となりますが、 G_x はそうではありません。すなわち、分解能を指定しても感度は一意には決まらず、両者の対応は一対一ではありません。

分解能を指定しても感度が決まらないのであれば、ある分解能に対して感度の最大値が存在することになります。分解能に関してこの最大値を対応させるのであれば、分解能と感度との対応が式で表せるはずです。この作業を以下で行ってみましょう。

与えられた R に対して、 G_x を最大にするような動作条件を最適条件と呼びます。この条件は次のようにして導かれます。まず、(11) の第1式を w_1 で解いて

第2式に入れます。すると G_x は α_{1m} だけの関数となるので、これを α_{1m} で微分して0とおきます。これによって、 G_x の最大値 $(G_x)_{max}$ と、その最大値を与える最適条件として $(w_1)_{opt}$ と $(\alpha_{1m})_{opt}$ が得られます。

結果を示せば、まず動作条件の最適値として、

$$(w_1)_{opt} = C_A(\alpha_{1m})_{opt}^2 = \frac{1}{3}C_E R \quad (12)$$

が得られます。最初の $(w_1)_{opt} = C_A(\alpha_{1m})_{opt}^2$ という等式は、収差によるボケの量がちょうどスリット幅に一致する場合が最適条件であることを言っています。これに対応する感度の最大値は、

$$(G_x)_{max} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{C_E^{3/2}}{C_A^{1/2}} R^{3/2} \quad (13)$$

で与えられます。

(13) が求めているもの、すなわち分解能と感度の関係を直接に示す式です。 R を指定したとき、 G_x は決まらないものの、その最大値 $(G_x)_{max}$ が一意に決定されます。

(12) を用いれば、必要な分解能 R の値が指定されたときに、スリット幅と入射角制限をいくらに設定すればよいかわかります。例として、中心軌道半径 $r_0 = 100$ mm のCHAによって、 $R = 0.03 = 3\%$ の分解能を得たいとしましょう。このとき、 $C_E = C_A = 2r_0 = 200$ mm ですから、(12) によって、 $w_1 = 2$ mm、 $\alpha_{1m} = 0.1$ rad $\simeq 6^\circ$ とすればよいことがわかります。

もし上記より小さい R を望む場合は、スリット幅をせばめて、同時に角度制限をきびしくします。そうすれば、 R だけを考えればいくらかでも小さな値にすることができます。その際は感度が低下しますが、その低下の程度は(13)からわかります。たとえば、この方法で最適条件を満たしながら R を $1/2$ にしたとすると、 G_x は $1/(2\sqrt{2})$ に低下します。

分解能と感度は一対一に対応せず、動作条件に最適値が存在するという事実は、アナライザをセッティングする際に忘れてはなりません。たとえば、分解能が期待した値より悪いときに、スリット幅を絞っていくことがよく行われます。もし α_{1m} を変えずに $w_1 (= w_2)$ だけ小さくしてしまうと、 $R = (C_A/C_E)\alpha_{1m}^2$ が下限となり、これ以上は小さくなりません。一方、スリット幅を小さくしていく過程で入射する電子はどんどん少なくなり、 $w_1 \rightarrow 0$ で感度は0になってしまいます。

α_{1m} だけ小さくしていった場合でも同様です。やはり、分解能は頭打ちになる一方で、感度だけ低下し

ていきます。分解能を好きなだけ下げたければ、 w_1 と α_{1m} を同時に制限していく必要があります。片方だけ小さくする方法では、最適条件からはずれる分、感度を不当に損してしまうわけです。

なお、スリット幅と入射角制限は固定したままで、入射電子をインプットレンズによって減速させる方が、 R を改善することによる感度低下の程度をやわらげることができます。(詳しくは§10.4.5で述べます。)

通常の応用では、スリット幅は、チャンネルترونなどの検出器の幅を考えれば数mm程度の値が適当です。そこでCHAは、スリット幅の最適値がその程度になるような分解能、すなわち上で示した数値例のような、 $R = 0.03$ の前後で使うのが適しています。この分解能で不足する場合は、減速によって値を調整するのがよいわけです。

10.4.3 アナライザのアクセプタンス

前項§10.4.2では、アナライザに入射が許される電子の量を感度としていましたが、ここで透過率を考慮しましょう。すなわち、アナライザに入射する電子のうちで、スペクトルのピーク値に寄与する量だけを感度に対応させます。

この厳密な意味での感度を決定するには、パスイネルギー E_p を変えていったときに、一度に検出器に入る電子量の最大値を決める必要があります。これを解析的に扱おうとすると、区分的に定義された関数の積分を行う必要があるため、不可能ではないにしてもかなり面倒です。

アナライザのアクセプタンスという概念を導入すると、入射した電子のうちで、検出器に入ることでできるものの条件を図形的に表示できるようになります。これを以下で説明します。

アナライザに入ることができても出ることができない、すなわち、入射スリットを抜けても出射スリットを抜けられずに検出器に入ることができない、という状況が生じるのは、アナライザの収差のせいです。2次の開口収差によってビームが x の一定方向に引きずられて、そのため出射スリットをはずれてしまう軌道がでてきます。

CHAの2次の開口収差は、入射角の2乗に比例して軌道を x の負の方向に引きずる働きです。この作用を、 $x_1\alpha_1$ 面から $x_2\alpha_2$ 面への写像として捉えることができます。この写像を図示するとFig.9(a)のようになります。(ここでも、 $w_1 = w_2$ という条件のも

とで考えます。)

もしアナライザが収差をもたず、レンズ作用だけであれば、アナライザ出口には入射スリットの倒立像が写ります。これは写像としては、原点に関して対称に図形をひっくり返す作用です。これに2次開口収差の作用が加わると、 α_1 の絶対値の大きな点ほど x の負の方向に引きずられて、結果として図に示したような対応となります。検出器に入れるような電子は、 $x_2\alpha_2$ 面において $|x_2| < w_2/2$ の領域に入るものであり、それが塗りつぶされた領域です。

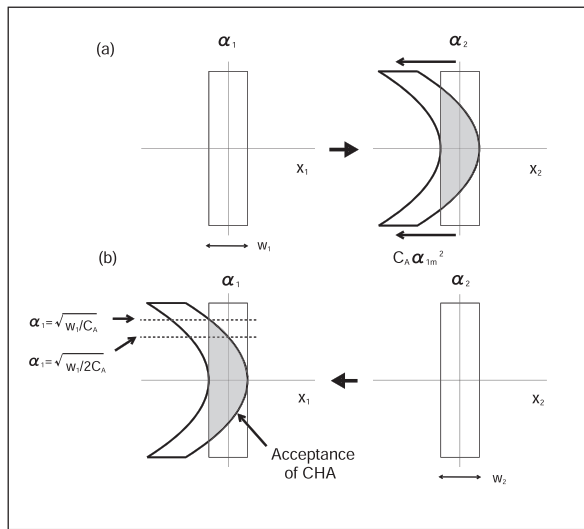


Fig. 9: Transfer of the emittance diagram by the lens action and the aperture aberration of the CHA: (a) from the entrance of the CHA to the exit; (b) reverse transformation.

この関係は、逆写像を用いて逆方向に考えることもできます。すなわち、図の(b)のように、出射スリットの内部に対応する $|x_2| < w_2/2$ の領域を、 $x_1\alpha_1$ 面に引き戻します。この図において塗りつぶされた領域は、「将来的に検出器に入れることのできる電子の入射条件」を示しているのです。より利用価値があります。このように、入射面において表示された、検出器に入れるような条件を与える領域が、アナライザのアクセプタンス図です。この面積がアクセプタンスと呼ばれます。

さて、分解能を指定しても感度は一意に決まらず、感度を最大にするような最適条件が存在することを前項で見たわけです。この事情を、透過率を正しく考慮した上で確認してみましょう。

Fig.10は、同一の分解能をもつ三つの動作条件のもとで、単色光源に対してのスペクトルを示しています。この計算では、光源から一定数の軌道を出して、

E_p を変えながら検出器に入る電子の数を数えることでスペクトルを得ています。このようにすれば、透過率は当然ながら正しく考慮されます。

図の三つの条件は、(11)の第1式が与える分解能 R が同一となるように、動作条件(w_1, α_{1m})が選ばれています。簡単に言うなら、Aはスリットを絞りすぎた場合、Cは入射角度を絞りすぎた場合で、ともに感度を損んでいます。中間のBが、感度が最大となる最適条件です。分解能 R は、本章ではすべてベースで定義した R_{base} の意味で考えていますから、図の三つのスペクトルは ΔE_{base} が共通になっています。この三つの条件についての詳しい説明を以下で述べます。

まず、図のそれぞれの動作条件は、 $x_1\alpha_1$ 面における長方形のエミッタンス図として示されています。前項では、この面積をそのまま感度と考えたわけですが、実際にはこのうちの、アナライザのアクセプタンス図と重なる領域だけがピーク値に寄与します。これが、塗りつぶされた領域で示されています。図のBの条件が、共有面積が一番大きくなる場合です。したがって、これが最適条件に対応します。

図のAの条件では、入射ビームのエミッタンス図がアクセプタンス図をはみ出しているのです。アナライザに入る量の一部しかピーク値に寄与していません。ピークに寄与しない電子は、単にスペクトルのすそを延ばして、分解能を損ねることしかしていません。

図のBとCの条件では、ほぼすべての入射ビームがピーク値に寄与しています。すなわち、透過率はどちらも1に近いわけです。しかし、ピークの高さには差があり、感度に関しては対等ではありません。つまり、透過率が高いことが最適条件に近いことを意味するものではありません。

スペクトルの形状に関して触れておきます。まずAの条件では、検出面でのビーム幅に比べてスリット幅が狭いので、ビームの電流密度分布がほぼスペクトルに反映されます。この電流分布は、2次開口収差に対応して非対称な形状となっています。Bでは、分布は広めのスリット幅でならされて対称に近づいています。しかし、まだ収差による非対称性が残っていて、ピーク位置が E_p からずれています。Cでは、入射角が小さく制限されているので、収差による非対称性はなくなり、検出面で一様な電流密度がつけられます。このような場合に、スペクトルは図のような三角形となります。

なお、Fig.9で説明したアクセプタンス図は、 $E_p = E_1$ の場合に検出器に入れるような条件を示すもので

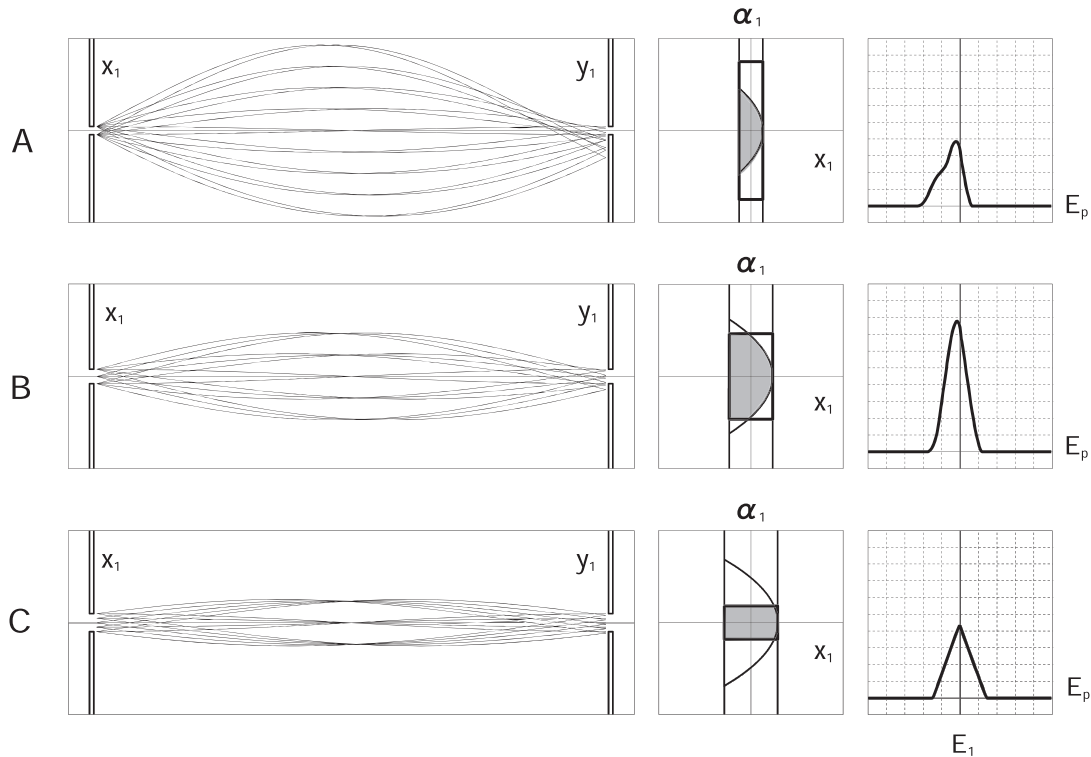


Fig. 10: Variations in the energy resolution function according to the emittance diagram at the entrance of the CHA. All these three have the same energy resolution, but a maximum sensitivity is attained in the case B.

す。しかし、スペクトルのピーク位置は、厳密には E_1 に一致しないわけです。 $E_p = E_1$ でなければ、軌道が全体的に分散方向にシフトするので、アクセプタンス図は少し x 方向にずらして考える必要があります。しかし、アクセプタンス図はあくまで眺めて考えるためのものなので、必要なら、定量的な計算の際にピーク位置を正しく考慮すればよいでしょう。

あるいは、 $E_p = E_1$ のときの検出量を感度と見なすべきである、という考え方もあるはずです。その場合には、厳密なピーク位置ではなく、 $E_p = E_1$ のときの検出量を感度に対応させることになります。そうすれば、アクセプタンス図はいつも $E_p = E_1$ のときだけ考えれば済みます。

10.4.4 感度に対しての最適化

ここでは、アナライザの透過率を正しく考慮したうえで、動作条件の最適化を行います。本項における数値例は、すべて CHA で $r_0 = 100$ mm の場合を示します。

まず、前項までにおいて天下りに導入した、 $w_1 = w_2$ という条件の正当性について示しておきます。アナ

ライザの動作条件は (w_1, w_2, α_{1m}) ですが、まず α_{1m} をある値に固定して、 (w_1, w_2) だけの最適化を行います。

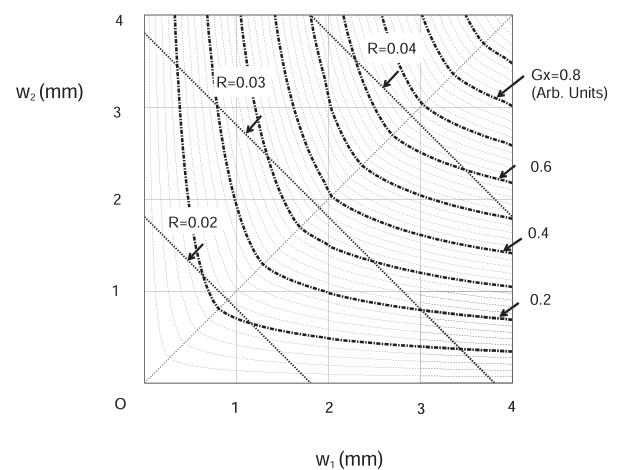


Fig. 11: Dependence of sensitivity G_x on the widths of entrance and exit slits.

この作業のために、やはり検出器に入る電子の数を数える方法によって、 (w_1, w_2) を座標とする平面上に感度の等高線を描きます。結果は Fig.11 のように

なります。ここには、(10) から得られる分解能の等高線も同時に示されています。

図からわかるように、分解能が一定値をとる直線上において、感度が最大となる点は $w_1 = w_2$ の直線上に並びます。この図は $\alpha_{1m} = 0.1 \simeq 6^\circ$ に固定した場合ですが、この値によらず最適条件は $w_1 = w_2$ で与えられます。

この結果は、分解能と感度の双方に関して、 w_1 と w_2 の役割が対等であることを意味します。分解能に関しては、(10) を見れば両者が対等であることがすぐわかりますが、感度に関しては自明ではなく、にわかには信じがたい結果です。

この結果から、 α_{1m} の最適化は $w_1 = w_2$ のもとで行えばよいこととなります。そこで今度は、 $(w_1, C_A \alpha_{1m}^2)$ を座標にとって感度の等高線を描くことができます。この結果は Fig.12 のようになります。図中には、Fig.10 の三つの条件に対応する点を示しています。

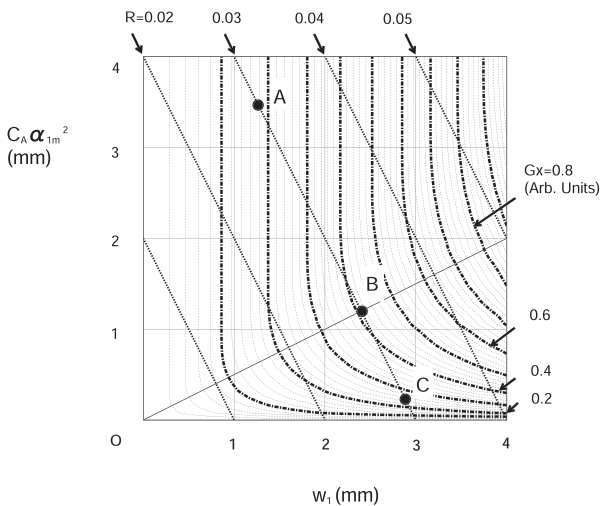


Fig. 12: Dependence of sensitivity G_x on the width of the entrance slit $w_1 (= w_2)$ and the blurring amount $C_A \alpha_{1m}^2$ due to the aperture aberration of the CHA.

この図から、最適条件は傾き 1/2 の直線上に存在することがわかります。 $w_1 = w_2$ という条件と合わせると、最適な動作条件は次のように与えられることとなります。

$$(w_1)_{opt} = (w_2)_{opt} = 2C_A(\alpha_{1m})_{opt}^2 \quad (14)$$

ある分解能に対してのスリット幅と入射角は、図から読み取ることができます。たとえば、 $R = 0.03 = 3\%$ に対しての最適値として、 $w_1 = w_2 = 2.35 \text{ mm}$ 、 $\alpha_{1m} = 4.6^\circ$ が得られます。

さて、透過率を考慮しないときの最適条件は (12) で与えられ、 $(w_1)_{opt} = C_A(\alpha_{1m})_{opt}^2$ でした。これを (14) の結果と比べれば、2 の因子だけ異なっています。(14) は、収差によるボケ量がスリット幅の半分になるときが最適条件であることを言っています。

この結果は、アクセプタンス図と関連づけることができます。Fig.10 の B の条件のように、エミッタンス図とアクセプタンス図がちょうどうまく重なるときが最適条件です。すなわち、アナライザの受け入れ条件をむだなく覆うように入射条件を決めればよいわけです。これが「整合」の条件であり、これを式で与えたものが (14) です。

一方 (12) の条件は、エミッタンス図の内部にアクセプタンス図が納まるような場合に対応します。これだと、アクセプタンス図をはみだす電子が多くなりすぎて、最適条件から外れてしまうわけです。

なお、整合のとれた条件においては、エミッタンス図とアクセプタンス図の共有面積は、エミッタンス図の面積で近似してしまってもそれほど悪くありません。この場合に限れば、(11) の G_x は正しく感度を与える表式となります。

10.4.5 減速の効果

減速を行うことの本質は、エネルギー分解能を向上させることです。CHA の開口収差は 2 次からはじまり、3 次からはじまる CMA に比べて分解能の面で劣ります。この CHA の欠点は、インプットレンズと組み合わせて、電子を減速させてから CHA に導くことで補われます。

インプットレンズの影響を議論するための準備として、本項では、面光源とアナライザの間になんらかの減速機構が存在するとして、その減速率によって分解能と感度がどのように影響を受けるかを調べます。

光源からの電子のエネルギーを E_0 として、これを減速させてからアナライザに入射させるとします。減速されたあとのエネルギーを、アナライザのパスエネルギーとして E_p とすれば、減速率は次式で与えられます。

$$\gamma = \frac{E_0}{E_p} \quad (15)$$

この γ は、減速の度合いが強くなるほど大きな値となります。(この逆数を減速率として定義する流儀もあります。)

減速が電子ビームにおよぼす効果は前回までに述べていますが、ここで要点をまとめておきます。電子

を減速するには、電子の進行方向と逆方向に電場からの力を加えます。電子はこれによって、「押し返され」ます。このとき、個々の電子の軌道がどのように変わるかはさまざまですが、電子の集合体としてのビームを考えれば、その空間的な広がりやビームの開き角がともに拡大する方向に作用を受けます。つまり、ビームがまとまる方向ではなく、「撒き散らされる」方向です。

このようなビームがこうむる変化は、相平面上のエミッタンス図によって示されます。エミッタンス図は、位置と角度に関してのビームのまとまり具合を示すものです。減速によって、この面積、すなわちエミッタンスが増大します。これは、ビームが撒き散らされることによる質の劣化を意味します。

輝度法則は、この面積の変化を規定するものです。輝度とは、相平面上の電子数密度です。減速によって輝度はもとの $1/\gamma^{1/2}$ に低下し、これに伴って、ビームのエミッタンスは $\gamma^{1/2}$ 倍に増加します。たとえば、もとのエネルギーの半分まで減速したとすれば、 $\gamma = 2$ ですから、エミッタンスは $\sqrt{2}$ 倍に増えるわけです。減速によってエミッタンスが増加する状況を Fig.13 に示します。

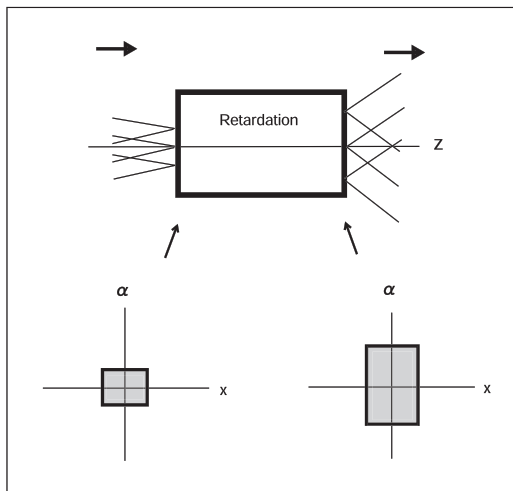


Fig. 13: Illustration of the effect of retardation on the emittance diagram of an electron beam.

第4章では、エミッタンスの変化の法則を静電レンズの1次軌道方程式をもとに証明しました。しかしこれは基本的な力学法則であり、一般のレンズにおいても、そしてレンズの収差を考慮してもやはり成立します。これが第8章において述べた内容です。

減速を行う方法による違いは、エミッタンス図の形状に現れます。たとえば、2枚のメッシュ間で減速を行う場合と、減速型の静電レンズによる場合では、

減速後のエミッタンス図の形が異なります。しかし、その際の面積の変化は減速率だけで決まり、減速の機構には依存しません。

減速の作用を、レンズの物面と像面の間で考える場合には、輝度法則を別の表現で与えることができます。レンズの結像作用に関して、像倍率 M が基本的な量です。これは、相平面上で考えれば、ビームの位置方向の広がりの変化を与えます。一方、角度方向の広がりの変化は、角度倍率 M_α で与えられます。

もしレンズによって加減速がなければ、エミッタンスが保存されるので、これは $MM_\alpha = 1$ を意味します。つまり、エミッタンス図の縦方向に拡大されれば、そのぶん横方向には縮小され、面積は変わらないということです。もしレンズによって減速が行われれば、エミッタンスは $\gamma^{1/2}$ 倍に増大するわけですから、これは、

$$MM_\alpha = \gamma^{1/2} \quad (16)$$

であることを意味します。これは、一次の光学理論における輝度法則の一つの表現です。

では、分解能に対する減速の効果を導きましょう。減速を行う場合の系全体としての分解能は、アナライザに入射する際のエネルギー E_p ではなく、分析されるもとのエネルギー E_0 に対して定義されます。アナライザ自身の分解能 R_A はやはり $\Delta E/E_p$ であり、系全体の分解能 R との関係が次のように導かれます。

$$R = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_p}{E_0} \frac{\Delta E}{E_p} = \frac{R_A}{\gamma} \quad (17)$$

よって、系全体の R は、 R_A に対して γ の因子の分だけ変化します。 γ を大きくすればするほど、系全体としての分解能を小さくできるわけです。これが、分解能に対する減速の効果です。

アナライザ単体の分解能 R_A として §10.4.1 で示したものをいれれば、上式は結局次のようになります。

$$R = \frac{1}{\gamma} \frac{2w_1 + C_A \alpha_{1m}^2}{C_E} \quad (18)$$

ここでは最適条件 $w_1 = w_2$ を用いています。

(18) から、減速の効果とはアナライザの分散係数 C_E を γC_E に増大させることであると見なすことができます。本当はアナライザ自身の性能は何も変わっていないわけですが、「アナライザの分散効果が増えることで分解能がよくなった」と考えるわけです。

さて、この分解能に対応する感度を考えましょう。減速によって輝度が $1/\gamma^{1/2}$ に低下するので、アナラ

イザの透過率を無視した場合の感度は、次式で与えられます。

$$G_x = \frac{1}{\gamma^{1/2}} 2w_1 \alpha_{1m} \quad (19)$$

この結果は、§10.3.1のFig.7と関連づけるとわかりやすいでしょう。そこでは減速を考えていなかったため、アナライザ入り口でのビームのエミッタンスが、そのまま試料面でのエミッタンスとなりました。もし試料とアナライザの間で減速が行われれば、アナライザ入り口でのエミッタンスを試料面に戻して考えたものは $1/\gamma^{1/2}$ に減少します。試料面におけるエミッタンスが G_x を定義するのでしたから、結局(19)の関係が導かれます。

ここで導いた(18)と(19)が、減速による分解能と感度の変化を示すものです。 γ を大きくしていけば、分解能がよくなるかわりに、感度 G_x は減少します。

さて、単に分解能をよくするというだけなら、減速を行わなくても、アナライザのスリット幅と入射角制限を変更すれば可能なわけです。そこで、減速を行って R を下げる場合と、減速を行わずにビームの制限を強めて R を下げる場合で、感度を比較してみましょう。

減速を行う際に、アナライザのスリット幅と角度制限は変えないとします。このときは、(18)と(19)の右辺における変数は γ だけです。たとえば、 R を半分にしたければ $\gamma = 2$ とすればよく、このとき G_x は $1/\sqrt{2}$ となります。一方、ビームを制限することで R を半分にする場合は、§10.4.2で見たように、感度は $1/(2\sqrt{2})$ となります。したがって、減速を行う方が感度に関して2倍得をするわけです。

この減速のメリットは、§10.4.2で行ったと同様の最適化を行って、分解能と感度の関係式を導けば、よりはっきりします。すなわち、減速が行われる状況のもとで、スリット幅と角度制限に関しての最適化を行います。結果は、まず最適な動作条件として、

$$(w_1)_{opt} = C_A (\alpha_{1m})_{opt}^2 = \frac{\gamma}{3} C_E R \quad (20)$$

が得られます。これに対応する感度の最大値は、

$$(G_x)_{max} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{C_E^{3/2}}{C_A^{1/2}} \gamma R^{3/2} \quad (21)$$

となります。

(21)から、ある一定の分解能 R に対して、 γ に比例して G_x が大きくなるのがわかります。この式は、同じ R を実現するために、 γ を大きくするほど感度を得ることを直接に表しています。

減速によってなぜ感度で得をするかは、(20)によって説明されます。所定の R に対して、 γ が大きいほど w_1 と α_{1m} を大きくすることができます。これが、輝度の低下によるデメリットを上回るわけです。

しかしながら、アナライザは一定のスリット幅で用いるのが便利なので、スリットを広げてよいと言われても、ふつうはその通りにする気にはなれません。通常は、感度を考えて減速比をきめるのではなく、アナライザ単体の分解能で不足する分を減速で補います。

さて、 y 方向の感度 G_y まで考えるとどうでしょうか。いまは仮想的な減速機構を考えているだけなので、 x 方向も y 方向も減速の効果は同じです。そこで、 G_y の表式はわからないにしても、それが G_x と同じ $\gamma^{-1/2}$ 依存性をもつことだけは言えます。結局、両方向を考慮した感度 G の γ 依存性は、

$$G \propto \frac{1}{\gamma} \quad (22)$$

で与えられることとなります。

y 方向まで考慮した場合でも、ビームを制限する方法に比べて減速のメリットはあるのでしょうか？ R を $1/2$ にする場合で考えれば、減速によってそれを行う際の感度は、上式から、 $1/2$ に減少するわけです。一方、ビームを制限する方法では、その制限は $x\alpha$ 面上でだけ行えばよいので、 y 方向まで考慮してもやはり感度の低下は $1/(2\sqrt{2})$ です。よって、感度に対して $\sqrt{2}$ の因子の分だけ、依然として減速によるメリットが得られます。

10.5 インพุットレンズの働き

10.5.1 インพุットレンズの構成

CHAを用いた分光系の構成のところ(§10.2.1)ですでに触れましたが、インพุットレンズを用いる主な目的は、ビームをアナライザまで運ぶことで試料周りの空間を確保すること、そしてビームの減速です。

インพุットレンズはとりあえず、試料からの電子をアナライザ入り口にフォーカスできなければなりません。大雑把に言えば、まずレンズ入り口でビームを絞って平行ビームにしたうえで、アナライザの手前まで運びます。そして、そこでもう一度集束させて、アナライザ入射面にフォーカスさせます。これは、ビーム輸送のためのレンズ(トランスファーレンズ)としての働きです。

ただし、フォーカス面をちょうどアナライザ入り口に設定するのではなく、それからわずかにずらす方

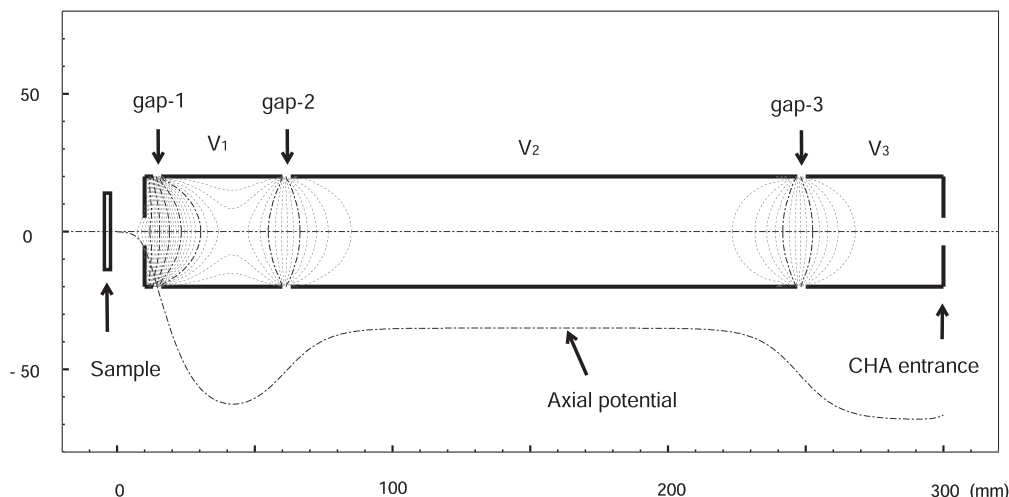


Fig. 14: Input lens system for pre-retardation composed of cylindrical electrodes.

が、メリットが得られる場合もあります。この状況は光源の性質によって変わってきます。一般に、アナライザ入り口と像面との距離、すなわちデフォーカス値 Δf が調整すべきパラメタとなります。

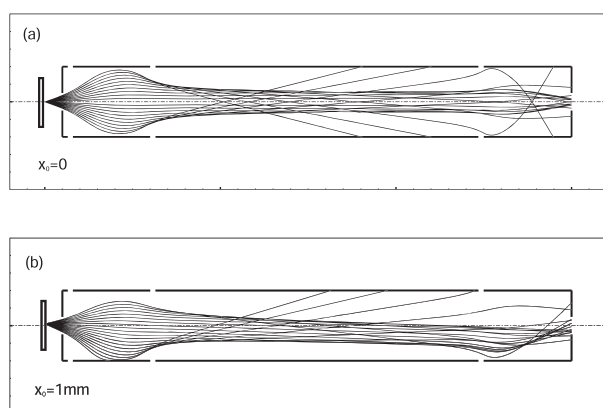


Fig. 15: Electron trajectories in the input lens for $\gamma = 5$ and $M_\alpha = 1$ with a small amount of defocus : (a) on-axis point source ($x_0=0$) ; (c) off-axis point source ($x_0 = 1$ mm).

フォーカス位置に加えて、そこでの像倍率 M が性能に影響する場合があります。これも光源の性質しだいですが、たとえばアナライザ入り口でのビームのエミッタンスとアクセプタンスの整合に関連して、 M が感度を左右することがあります。また、インプットレンズの収差が M に依存するので、 M は収差を最小化するためのパラメタとしても働きます。

なお、点光源の場合には像倍率は直接の意味をもち、かわりに角度倍率 M_α が重要なパラメタとなります。しかし、 M と M_α は (16) の関係で結ばれて

いるので、どちらを用いても本質的に違いはありません。

さらに、インプットレンズによってビームの減速率が設定されます。減速の度合いによってエネルギー分解能が左右されますが、一般には感度も同時に変わります。

以上から、インプットレンズに要求される基本的な機能は、(1) フォーカス位置、(2) 倍率 M 、そして (3) 減速率という三つのパラメタの調整です。そこでインプットレンズは、少なくともこれらのパラメタの数、すなわち最低限三つの自由度を有する必要があります。このようなインプットレンズの構成例を Fig.14 に示します。

Fig.14 は静電レンズとしての構成例です。最初の電極は、通常は試料と同じアース電位、そして、それに続く三つの電極の電位 V_1 、 V_2 、 V_3 を可変にすることで、上記の三つのパラメタの調整を行います。図においては、レンズ中の静電ポテンシャル分布、および軸上ポテンシャルも示されています。これらはもちろん、各電極の電圧で変わってきます。

Fig.15 は、このレンズ中の軌道の計算例を示しています。図 (a) は軸上光源、(b) は軸外光源に対してのものです。レンズ作用は、各電極間のギャップ位置 (Fig.14 の gap-1, gap-2, gap-3) で発生する電場によってつくられます。これらのギャップはそれぞれ、第4章で述べたイマージョンレンズとして働きます。各ギャップが減速型のイマージョンレンズとなるか、あるいは加速型となるかは、電極間の電位差によって変わってきます。各ギャップ位置を通過するたびに、ビームは減速か加速かどちらかの作用を受けます。

第4章で述べたように、静電レンズとは、ビーム

の減速あるいは加速に付随して生じる集束作用を利用するものです。インプットレンズの場合には、減速そのものが目的の一つであるので、少しややこしくなります。すなわち、ビームの加減速はレンズ作用を得るための手法であると同時に、最終的には所定のエネルギーにまで減速する必要があるわけです。

イマージョンレンズによって、ビームの減速と集束が同時に行われるのは便利なことです。しかし、減速だけ行いたくてもレンズ作用が必然的に伴い、逆に、ビームの集束だけさせたくてもエネルギーまで変えてしまうので、分光系の振る舞いが難解なものになってしまうという側面があります。

純粋にビームの減速だけを行い、電子軌道の形状を不変に保つ方法があれば一番よいのですが、それが不可能であることは輝度法則が言うところです。すなわち、減速によって相空間においてビームが占める領域が拡大し、ビームの質が損なわれます。この意味で、減速は必ず電子軌道の変換を伴うものです。その作用が「レンズとして」解析可能であることが、静電レンズ系を採用することのメリットと言えなくもありません。

もちろん、静電レンズは構造が単純であり、磁場型レンズのようにコイルやヨークのための場所をとることもなく、あるいは真空中に導入しやすいなどの理由で、安易にこのような系が採用されてきたという面もあるでしょう。将来的に、インプットレンズ、あるいは一般に減速光学系に対しては、新しいアイデアが導入される余地が多くあります。

さて、Fig.14の系に戻ります。試料から出る電子のエネルギーを E_0 、アナライザに入射する際のエネルギーをパスエネルギーとして E_p とします。このときのインプットレンズによる減速率は、(15)と同じ次式で与えられます。

$$\gamma = \frac{E_0}{E_p} \quad (23)$$

ビームがレンズ終端に達したときのエネルギーは電圧 V_3 だけで決まるので、 γ の値は V_3 によって設定され、残りの V_1 と V_2 によって、フォーカス位置と M の調整が行われます。

さて、 V_3 によって最終的なエネルギーが決定されるのは確かですが、すでに上で述べたように、最後のギャップ (gap-3) においてだけ減速が行われるのではありません。まず gap-1 において、ビームがだいたい光軸と平行になるまで集束される必要がありますが、このレンズ作用は、ふつうは減速によって行われま

す。次の gap-2 において、加速してもとのエネルギーの側に戻すか、あるいはさらに減速させるかは、 γ と M の値によって変わってきます。

最初の gap-1 における集束作用は、もちろん加速によって行うことも可能です。イマージョンレンズは一般に、減速型よりも加速型のほうが収差が小さいので、そのようにしたくなります。しかし、最終的にはビームは減速される必要があるので、最初に加速してしまうと、その下流における減速率が高くなり、全体としての収差をかえって悪くしてしまう場合があります。インプットレンズの電圧条件の決定は、このような収差係数の評価にもとづいて行われる必要があります。

Fig.14 のインプットレンズは、原理的な説明を優先するために、電極形状を簡略化しています。たとえば AES 用のインプットレンズを設計するなら、1次電子ビームの照射光学系を邪魔しないように、先端を先細りにする必要があるでしょう。また、試料側に電場がもれると1次ビームに影響があるので、先端のアース電極の孔径を小さくする、あるいはレンズをなるべく試料から離すなどの処置が必要です。XPS 用の場合でも、試料に X 線を照射する方法に応じて、やはり先端付近の形状が制約を受けます。

10.5.2 エネルギースキンのモード

本章において、ここまではほとんど単色光源を考えてきました。しかし実際には、試料から放出される電子はエネルギー分布をもち、その分布を測定することが分光系の役割です。

スペクトルを得るために、アナライザの出射面につくられる分散像を画像として直接取り込む方法があります。しかし前回は述べた通り、この方法では像強度と電流密度との対応が知れないと定量的には問題があります。一般には分散像のスペクトルの並び方はエネルギーに関して線形ではなく、また、一度に測定可能なエネルギー領域が限られるという欠点もあります。

ふつうは、ここまで述べてきたように、アナライザの出射スリットのうしろに電流検出器を置いて、検出器に入ることでできる電子のエネルギーをなんらかの方法でスキャンします。インプットレンズによって減速が可能である系では、次の二つのモードがよく用いられます。

一つ目は、エネルギースキンの過程を通して相対分解能 $R = \Delta E/E_0$ が定数に保たれるモードで、こ

これは **CRR** (Constant Retarding Ratio) モードと呼ばれます。もう一つは絶対分解能 ΔE が定数となるもので、これは **CAE** (Constant Analyzing Energy) モードと呼ばれます。

これらのモードの呼び方は、スキャンが行われる際の装置の条件をそのまま示すものです。CRR モードにおいては、分析されるエネルギー E_0 のスキャン中に減速率 $\gamma = E_0/E_p$ が一定に保たれます。スキャン中にアナライザのスリット幅と角度制限が固定されている限り、(18) によって相対分解能は変化しません。

一方 CAE モードでは、 γ が E_0 に比例して変えられることで、 E_p が一定に保たれます。この結果として、絶対分解能 ΔE 、あるいはアナライザ単体としての分解能 $R_A = \Delta E/E_p$ が一定に保たれます。

以下において、これらの二つのモードの特徴を詳しく述べていきます。まず CRR モードでは、減速率が一定なので、インプットレンズの各電極にかかる電圧は単に E_0 に比例して変えていけば済みます。また、CHA のように電場だけを用いるアナライザであれば、その内部の電圧もすべて E_0 に比例させればよいわけです。

一般に電場中の電子軌道は、電子のエネルギーと電場強度を同じ比率で変化させれば、同じ形状が保たれます。そこで、CRR モードにおいて試料から出て検出器に至る電子軌道の様子は、エネルギー・スキャンの間、不変に保たれます。したがって、試料面での取り込み面積と取り込み角は、スキャン中に変わることがありません。あるいは同じことですが、単色光源に対してのスペクトル、すなわち分解能関数のピーク値が一定に保たれます。

現実に測定対象となるエネルギー分布に対して、それと分解能関数とのコンボリューションをとったものが、最終的に測定されるスペクトルです。分解能関数の幅 ΔE がエネルギーに比例することから、実測されるスペクトルのピーク強度は実際の比率を反映せず、エネルギーとともに増えていきます。(一度に検出器に入ることのできるエネルギーの幅が増えるのでピーク値が大きくなる、と考えても同じです。)

このコンボリューションの計算例を Fig.16 に示します。測定対象となる真のスペクトル $N(E)$ に対して、ピーク強度と同程度のバックグラウンドを想定しています。 $N(E)$ のピーク部分と分解能関数 $R(E)$ をともにガウス型に仮定した場合の、両者のコンボリューション $N(E) * R(E)$ は図のようになります。

バックグラウンドのみに対しての $R(E)$ とのコンボリューションを考えると、 $R(E)$ の幅 ΔE が E に比

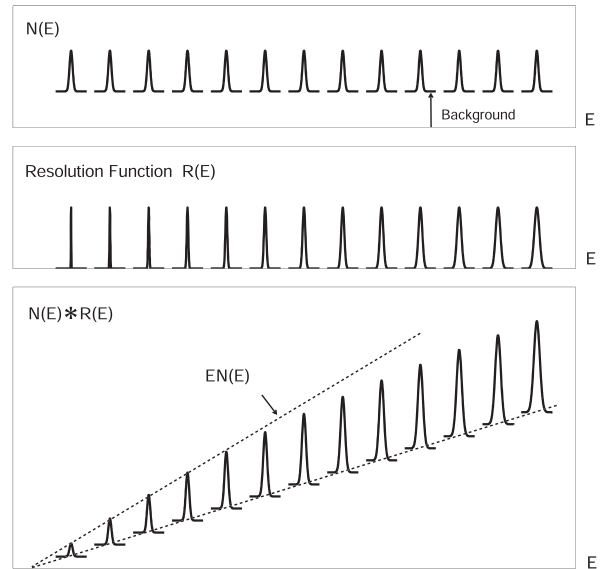


Fig. 16: Measured energy spectra are obtained by the convolution of a true energy spectrum $N(E)$ and resolution function $R(E)$.

例することから、単純に E に比例して増加していきます。もし $N(E)$ の幅にくらべて ΔE が小さく設定されていれば、実測されるスペクトルのピーク値も E に比例します。この条件のもとで CRR モードで測定されたスペクトルは、真のスペクトル $N(E)$ に対して $EN(E)$ と記されることがあります。

ただし、 E がそれより大きくなると、ピーク値は頭打ちとなります。これは、 $R(E)$ の幅に比べて $N(E)$ の幅が相対的に小さくなるので、単色光源の場合、すなわちスペクトルのピーク値がエネルギーによらないという状況に近づくからです。

このように、CRR モードにおいては、取り込み面積と取り込み角で定義される感度、すなわち分解能関数のピーク値は一定であるのに対して、実測されるスペクトルのピーク強度はエネルギーとともに増大していきます。もちろんこれは、装置の感度が増すからではなく、分解能 ΔE が劣化する代償として得られる見かけ上のものです。

つぎに、CAE モードを考えます。このモードでは、スキャン中にアナライザのパスエネルギー E_p が一定です。よって、アナライザ単体としてはすべての条件が固定でよいことになります。このモードにおいては、インプットレンズは、分析すべき電子のエネルギー E_0 が変化してもアナライザ入り口でつねに同じ E_p になるように、減速を行わなければなりません。

このためには、インプットレンズの最後の電極の電位 V_3 を、 E_p が一定となるように変えていけばよ

いわけです。しかし、それだけでは済みません。単に V_3 を変えるだけでは、ビームのフォーカス位置や倍率 M が変化してしまうので、 V_3 の変化とともに V_1 と V_2 を変えて、うまく軌道の最適条件が保たれるようにしなければなりません。そこで、各電極電圧の E_0 依存性は一般に非線形となります。この依存性の通りに、電極電圧が制御されなければなりません。

このことから、電子軌道の形状はスキャン中に不変というわけにはいかず、レンズ電圧の非線形性を反映して、複雑に変化していきます。そこで、スキャン中に分解能関数の幅 ΔE は一定に保たれるものの、そのピーク値は一般に変化していきません。

では、分解能関数のピーク値は γ とともにどのように変わっていくのでしょうか。§10.4.5における議論のように、 γ が大きいほど輝度が低下することから、エネルギーとともにピーク値が減少していくことが予想されます。すなわち、上記の非線形な軌道の変化は、輝度法則を反映したものになるはずですが、実際、現実の装置においてそのような傾向があります。しかし、インプットレンズの存在のもとで、輝度法則だけで感度の議論が済むとは限りません。(この問題は次節 §10.6 以降で詳しく考えて行きます。)

CAE モードは、分解能が優先される XPS などで採用されます。その際に測定されるスペクトルは、 ΔE は一定に保たれるものの、ピーク強度は一般にエネルギーとともに減少してしまうわけです。そこで、分解能よりも S/N の確保が優先される AES では、CRR モードが好まれます。ただし AES でも、ケミカルシフトの測定などの高い分解能が要求される場合には、CAE モードが用いられることがあります。

スペクトル強度に関する定量性を問題にする場合、CRR モードでは分解能関数のエネルギー依存性が単純なので、分光光学系からの感度の寄与は解析が容易です。(スキャン中に E_p が変わることから、電流検出系の感度のエネルギー依存性がかわりに問題となります。)

一方 CAE モードでは、分解能関数のピーク値のエネルギー依存性は、容易には知れません。このモードではアナライザ以降の光学系は固定ですから、唯一、インプットレンズの動作の非線形性がこの問題に関与します。CAE モードにおける感度の変化、言い換えれば感度の γ 依存性を知ることが、定量性の確保のための課題となります。

10.6 減速による感度の変化

分光系を利用するうえで、減速率 γ によって感度がどのように変化するかを知ることが重要です。本節では、インプットレンズにおける減速が感度におよぼす影響を考えます。

10.6.1 インプットレンズによるケラレ

§10.4.5 では、面光源とアナライザの間に減速機構が存在するとして、感度の γ 依存性を調べました。ここでの結論は、 x 方向と y 方向で定義した感度 G_x 、 G_y は、ともに輝度法則によって $\gamma^{-1/2}$ 依存性となり、よって感度 G は γ^{-1} 依存性をもつということでした。

この結論は、減速がインプットレンズによって行われる場合でも適用されるのでしょうか？たとえば、 G_x に関する議論を思い出すと、アナライザのアクセプタンスを輝度法則を用いて光源面に戻し、それを G_x としました。輝度法則は減速の方法とは無関係ですから、インプットレンズで減速を行う場合でも、これと同じ論法が通用するように思えます。

この議論において、見落とされていることがあります。それは、電子が試料面からアナライザに至る過程で、電子がインプットレンズに入れない、あるいは入っても途中のレンズ電極にぶつかって失われる、という可能性です。この現象を、光の系の場合をまねて、ケラレ、あるいは口径蝕 (Vignetting) と呼ぶことにします。この様子は、§10.5.1 の Fig.15 から見てとれるでしょう。

輝度法則は、本来は一本一本の軌道に沿っての微分量で表すべきものです。二面間で連続的につながった軌道の集合に対しては輝度法則が適用されますが、途中で途切れてしまうような軌道は、考慮からはずさなければなりません。§10.4.5 では、電子が途中でケラれるという可能性をまったく想定していません。ケラレを考慮することは、非常に泥くさい作業ではあっても、この現象が感度に影響する以上は、避けて通ることはできません。

ケラレは、レンズ電極の内面の穴径を大きくすれば防げると思われがちですが、そうではありません。穴径を大きくすると、そのぶん軌道も広がるので、要求されるレンズ作用を保ったままケラレを減らすことは楽ではありません。また、軌道が軸外領域に広がることで、収差を増やしてしまう恐れがあります。しかしそれ以前に、インプットレンズに許される空間に限られることが多く、穴径を増やすこと自体難しい

のが通例です。

われわれにとって必要なことは、インプットレンズによるケラレが γ によってどう変わるかを知ることです。これは最終的には、具体的なレンズ形状を用いて軌道計算するしかありませんが、傾向だけでも予測してみましょう。

この考察のために、Fig.17のような金属チューブを考えて、その手前に面光源が置かれた状況を想定します。光源面において特定の初期条件をもつ電子だけがチューブを通過でき、それ以外は、もともとチューブに入れないか、入っても途中の壁にぶつかって失われてしまいます。この系は、ケラレという現象を考えるための簡単なモデルとなります。

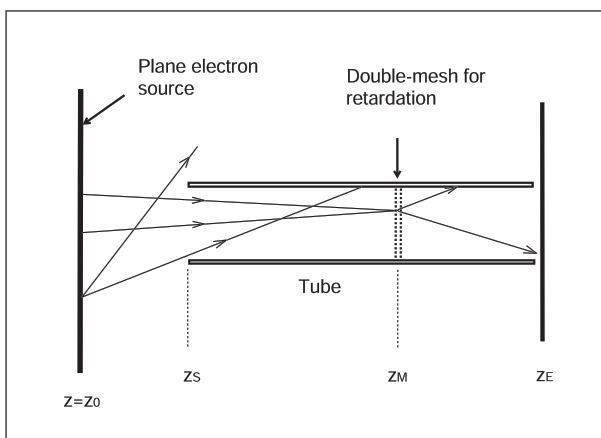


Fig. 17: Simple model for the consideration of the degree of vignetting in an input lens system.

この系において、チューブのどこかに二重のメッシュを置いて、そのメッシュ間に電位差をもたせて減速を行うとします。(このメッシュの前後におけるチューブの電位は、メッシュの電位に合わせて、とびをもたせます。)もしメッシュ間の距離が十分小さければ、減速の前後で軌道の位置の変化は無視できるので、ビームの開き角ををひろげることだけが減速の効果です。

この減速によって、チューブによるケラレの程度がどのように変わるかを調べてみます。また、二重メッシュを置く位置によって結果が異なるかも知れませんが、それも調べましょう。

Fig.18の(a)は、減速を行わない場合について、光源面から見たチューブのアクセプタンス図、およびチューブ終端に到着する際のビームのエミッタンス図を示しています。チューブのアクセプタンス図とは、光源から軌道が、途中でケラレずにチューブ終端に達するための条件を、光源面において示すものです。

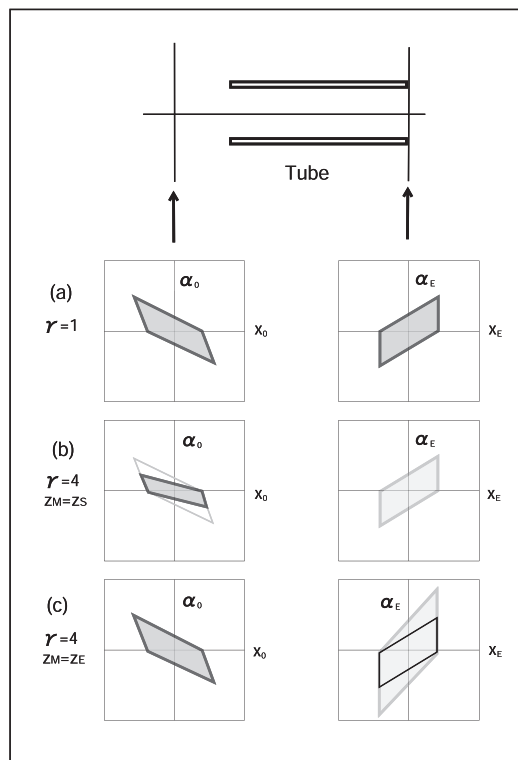


Fig. 18: Variations in the acceptance and emittance diagrams of the tube according to the position of a double-mesh.

この場合の、光源面でのアクセプタンス図からチューブ終端でのエミッタンス図への変換においては、加減速がないことから、面積が保存されます。両方で形状は異なりますが、これはドリフト空間における相平面上の写像として与えられるものです。(これに関しては第8章で説明しました。)

図の(b)は、チューブの入り口に二重メッシュが置かれ、そこで $\gamma = 4$ の減速が行われる場合です。このときは、電子がチューブに入る際に、光軸とのなす角が広がられます。このため、チューブ終端に到達できるための条件は(a)の場合よりもきびしくなります。これによって、アクセプタンス図が縮小されます。

このときの、アクセプタンスの縮小比率はどうなるのでしょうか？ チューブ入り口でビームの開き角が増大しますが、チューブが十分長ければ、終端に達したときのビームのエミッタンス図は(a)と同じはずです。つまり、終端に達する電子量は減りますが、それは入り口でビームが「薄められた」ためであり、電子が到達する際の位置と角度の関係に関しては変更はないはず。とすれば、それを光源面に戻して考えれば、輝度法則によって面積は $\gamma^{-1/2}$ 倍、すなわち $\gamma = 4$ の場合は $1/2$ になるはず。この面積の減少

が、ケラレの程度が増すことによる、チューブ終端に達することのできる電子数の減少を示すものです。

図の(c)は、同じ $\gamma = 4$ の二重メッシュをチューブ終端に置く場合です。このときは、電子は終端で角度を変えられるだけですから、終端に達するための初期条件は減速による影響を受けません。よって、アクセプタンス図は減速のない場合と変わりません。一方、終端でのエミッタンス図の面積は、角度の変化のために(a)の2倍になります。もしメッシュがチューブの途中におかれれば、(b)と(c)の中間の状況になることが理解されるでしょう。

以上のように、ケラレの程度は、チューブ先端で減速が行われる場合にもっとも大きくなります。その際のアクセプタンスは、減速を行わない場合の $\gamma^{-1/2}$ 倍に減少します。もし減速がチューブ終端で行われれば、減速によるアクセプタンスの変化はありません。この結果は輝度法則からくるものであり、ケラレという現象は、輝度法則とは無関係のように見えても、実はこの法則の支配下にあるわけです。

この考察によって、現実のインプットレンズ中で起きるケラレに関して、予想が立ちます。すなわち、ケラレの程度は、減速作用の重心がインプットレンズのどこに存在するかには依存するはずですが、ケラレによるアクセプタンスの減少は、最悪の場合で $\gamma^{-1/2}$ の依存性となるでしょう。CAEモードでは、レンズ電極の電圧は非線形に変わるのでしたから、減速の重心位置は固定ではなく、エネルギー स्क্যানとともに移動していきはらずです。

現実インプットレンズによるケラレを決定するには、具体的に電極形状を用いて数値計算するしか方法がありません。Fig.14のインプットレンズに対して行った計算の結果をFig.19に示します。

この計算においては、各 γ に対して、レンズ終端に像面がくるように、かつ角度倍率が $M_\alpha = 1$ に保たれるようにレンズ電圧を決めています。光源面から一様に電子を出して、レンズ終端に達する電子の数を数え、それをインプットレンズのアクセプタンスとしてプロットしています。なお、図では球面収差係数 C_S の変化も同時に示されていますが、これはのちの項の議論で用います。

図においては、1次軌道を用いた場合と、レイトレースによって正しく収差を考慮したときの結果を示しています。一般に、このように1次軌道とレイトレースの結果を比べることで、収差の寄与の程度が判定できます。ある性能に関して収差が寄与するなら、レンズ設計に際して収差に関しての最適化を行うべ

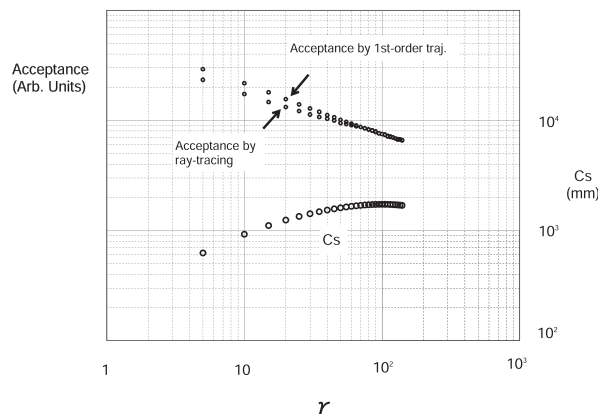


Fig. 19: Acceptance of the input lens as a function of retarding ratio γ . The dependence of spherical aberration coefficient C_S on γ is also shown.

きです。逆に、収差は寄与しないという状況もありえます。(厳密に言えば、収差が補正されたときの軌道が1次軌道になるわけではありません。これに関しては第8章を見てください。)

図の結果を見ると、収差を考慮するかどうかで若干異なるものの、大雑把に見れば、アクセプタンスの変化はほぼ $\gamma^{-1/2}$ 依存性をもっています。これは、 γ の全域において減速作用が先端に偏っていることを示しています。この結果はもちろん、電極形状やレンズ電圧の選び方で変わってくるので、普遍的な意味はありません。形状と動作条件の定まったインプットレンズに対して、このような計算が可能であるということに意味があります。

ここでは $x\alpha$ 面上のアクセプタンスを考えましたが、レンズは軸対称なので、 x 方向と y 方向で状況は同じです。よって、このインプットレンズにおいてレンズ終端に達することのできる電子の数は、両方向を考慮すると、 γ^{-1} の依存性で減少することが結論されます。

10.6.2 面光源に対する感度

インプットレンズによるケラレの様子が明らかになったので、感度の問題に戻しましょう。

まず、 x 方向の感度 G_x から考えます。いままでは、アナライザのアクセプタンスに輝度の低下を考慮したものが G_x であると考えていたわけです。この方法で G_x が得られるのは、アナライザのアクセプタンス

がすべて埋められるときだけです。そのような場合だけ、 $G_x \propto \gamma^{-1/2}$ となります。もしインプットレンズによるケラレの影響があれば、アナライザのアクセプタンスが埋められる保証がなくなります。

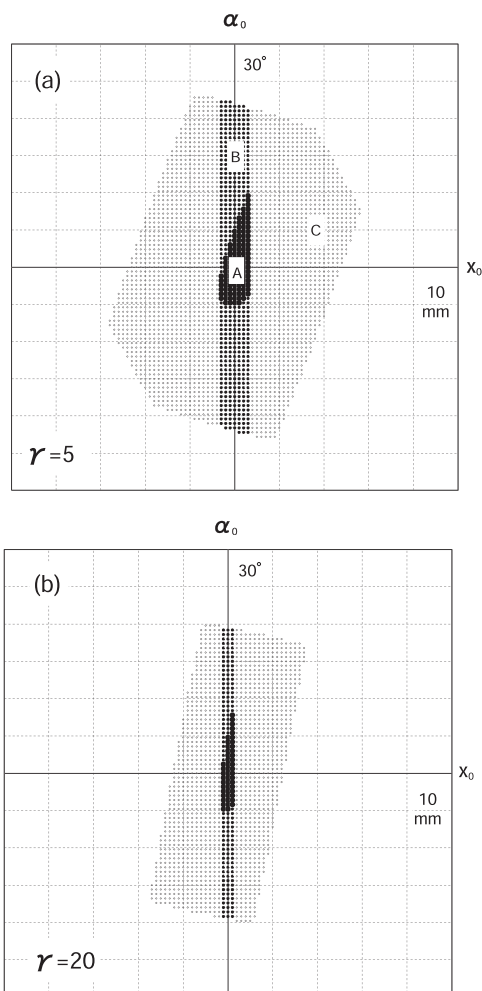


Fig. 20: Acceptance diagrams of the CHA (region A), entrance slit (A+B) and input lens (A+B+C) seen from a sample plane. These were calculated on the first-order approximation.

一方、 y 方向では、アナライザのアクセプタンスは非常に大きいので、インプットレンズの終端に達することのできた電子は、すべて感度に寄与すると考えてよいでしょう。とすれば、 G_y を決めるのはインプットレンズによるケラレそのものです。われわれのインプットレンズ (Fig.14) に対して、ケラレの γ 依存性はすでに前項 §10.6.1 で計算しましたから、それがそのまま G_y の γ 依存性を与えます。すなわち、 $G_y \propto \gamma^{-1/2}$ です。

残された仕事は、アナライザのアクセプタンスが、ケラレないですべて埋められているかどうかを確認

することです。このために、前項でチューブに対して行ったのと同様の、試料面から見たインプットレンズのアクセプタンス図を描きます。これは、レンズ終端に達することのできるような電子の初期条件を示すものです。終端に達した電子のうち、アナライザのアクセプタンス内部に入るものとそうでないものを区別して図示します。

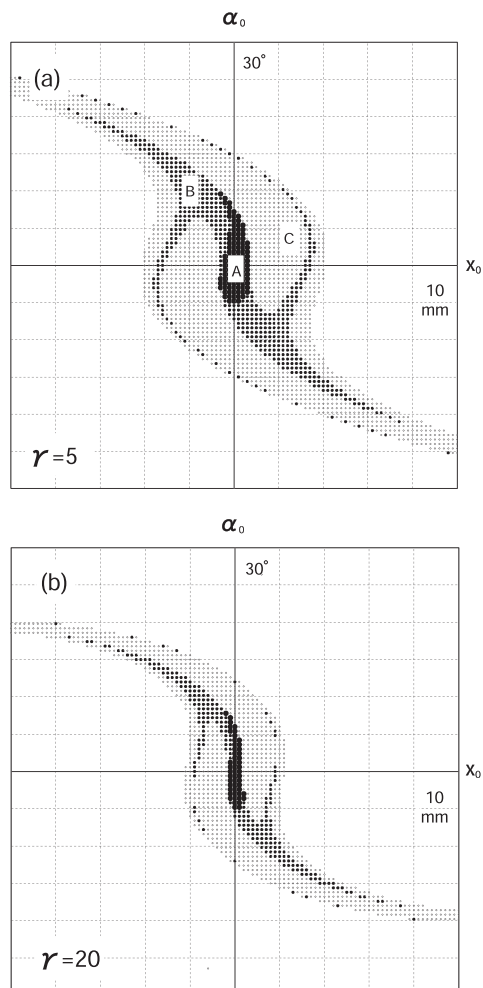


Fig. 21: Results corresponding to Fig.20 calculated by ray-tracing.

このようにして描いたアクセプタンス図が Fig.20 です。図 (a) が $\gamma = 5$, (b) が $\gamma = 20$ の場合であり、1次軌道に対してのケラレを判定しながら描いたものです。これらに対応した、レイトレースによる計算結果が Fig.21(a), (b) です。

まず Fig.20(a)(b) を見ましょう。塗りつぶされている領域のうち、A は、将来的にアナライザのアクセプタンスに入ることのできる条件に対応します。(この図自体は x 方向と y 方向で共有ですが、アナライザのアクセプタンスを考えると $x_0\alpha_0$ 面として見

ます。)

この領域 A は、試料面からレンズを通して眺めたアナライザのアクセプタンス図と考える方がわかりやすいでしょう。このアクセプタンスの一部がレンズで遮られることなく、全体が試料から見えていることがわかります。この領域の面積が G_x であり、これが輝度法則にしたがって $\gamma^{-1/2}$ 依存性で縮小していくことで、 $G_x \propto \gamma^{-1/2}$ となるわけです。

領域 B は、 $x_0\alpha_0$ 面において、入射スリットに入ることはできるがアクセプタンスからは外れるような条件です。この領域に入る電子は、アナライザの入射角度制限によってカットされます。領域 A と B を合わせたものは、入射スリットのアクセプタンスです。領域 C は、入射スリットには入れないが、ともかくレンズ終端まで達することのできる条件です。三つの領域を合わせたもの、すなわち、塗りつぶされた領域の全体は終端に達する電子に対応し、この面積が G_y を与えます。

つぎに、レイトレースによる結果 Fig.21(a)(b) を見ましょう。アナライザのアクセプタンスを試料面から眺めた場合、レンズの収差の影響でゆがんで見えます。しかし、このアクセプタンスがケラれることはありません。つまり、減速を行っても、アナライザのアクセプタンスが見えなくなるという状況はないということです。

収差の影響は、試料上のどんな位置からどんな角度で出た電子がアナライザに入るかという条件の違いとして現れます。面光源の場合、ある電子が収差の影響でアクセプタンスを外れたとしても、代わりに別の初期条件をもった電子がアクセプタンスに入ることになるでしょう。このために、収差は感度に影響しなくなるのです。

さて、Fig.20 と Fig.21 では、 $\gamma = 5$ と $\gamma = 20$ の場合しか示していませんが、これより γ を大きくした場合に、アクセプタンスがケラれる心配はないでしょうか？

もしアナライザのアクセプタンスがケラれるとすれば、試料面で見たアナライザのアクセプタンスが減速とともに収縮する速さよりも、終端まで達することのできる領域の収縮の方が、速く起きる必要があります。しかし、前節で見たように、一般にケラレによるアクセプタンスの収縮は、一番速い減少のし方で $\gamma^{-1/2}$ であるわけです。このことから、ケラレの方が追いついて、アナライザのアクセプタンスが試料から見えなくなることはありません。アナライザのアクセプタンスがすべて埋められていることの確認は、

ひとつの γ に対して行えば十分であるわけです。

結局、われわれのインプットレンズに関しては、アクセプタンスがいつでも満たされることから $G_x \propto \gamma^{-1/2}$ であり、またケラレが $\gamma^{-1/2}$ 依存性をもつために $G_y \propto \gamma^{-1/2}$ です。そこで、両方向を考慮したこの系の感度は、 $G \propto \gamma^{-1}$ であることが結論されます。

文献によっては、 x 方向でインプットレンズの制限が支配的になる場合、および y 方向でアナライザの制限が支配的になる場合も議論の対象となっています。しかし、そのような状況は現実には想定しにくいことが、本項によって理解されるでしょう。

10.6.3 視野制限モード

前項の議論においては、面光源に対しての感度を増やすために、取り込み面積（および取り込み角度）が大きければ大きいほどよいという立場でした。一方で、特定の領域だけを選んで分析を行いたいという場合があり、その際には積極的に取り込み領域を制限する必要があります。

たとえば XPS では、X 線は試料面の広い領域に照射されるので、前項の状況となります。もし、特定の場所から出た光電子だけを分析対象としたければ、視野制限を行うモードが必要です。XPS では X 線を細く絞るような方法も行われますが、ここでは、インプットレンズ側で視野を選ぶ方法について説明します。

レンズによって視野制限を行うための、原理的な構成を Fig.22 に示します。これは、最初のレンズ L_1 によって試料の中間像をつくり、この像の位置に視野制限絞り（ここでは API と呼びます）を入れることで、像の一部だけを選択するものです。視野選択されたビームを、そのままアナライザに入射させることも可能ですが、次段のレンズ L_2 を介して、この L_2 において減速とフォーカス条件の調整を行うことができます。

結像レンズ L_1 は、多かれ少なかれ収差をもつので、中間像は一般に収差でボケています。このボケが大きいと、像の位置に絞りを置いても、きれいに特定の領域だけを選ぶことができません。そこで、中間像はある程度の空間分解能をもつ必要があります。

このボケをつくる収差は、視野が狭ければ、球面収差だけを考慮すれば済みます。球面収差による像のボケは、電子の取り込み角 α_{om} の 3 乗に比例し、要求される空間分解能が得られるように α_{om} を制限しなければなりません。要求される空間分解能から α_{om}

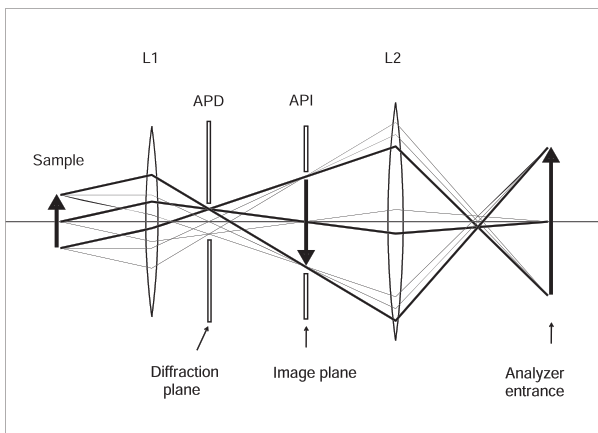


Fig. 22: Ray diagram of the input lens system which selects a specified region on a sample plane.

が定まり、これが視野制限モードにおける感度を決定します。(視野、すなわち取り込み面積が最初に指定されているので、感度を左右するのは取り込み角だけです。)

角度制限を行うために、視野制限とは別の絞り APD が用いられます。この絞りは、回折面に置かれる必要があります。回折面とは、試料から同じ角度で出た軌道がそれぞれ同じ点に集まるような場所でした。そこで、回折面におかれた絞り径を小さくしていくと、角度だけが制限されて、視野には影響がありません。図では、試料面から同じ角度で出た軌道を太線で描いているので、APD によって角度だけが制限される様子が見てとれるでしょう。

この系において、要求される空間分解能と取り込み角の関係を考えましょう。レンズ L_1 の球面収差係数を C_S とします。この収差係数によって、試料面から角度 α_o で出た軌道が像面でこうむる収差量が $\Delta x_i = C_S \alpha_o^3$ で与えられます。

いまの場合は、試料面で選択される領域のボケを問題としたいので、この収差量をレンズ倍率 M で割って、試料面に換算したほうがわかりやすいでしょう。これは第5章で説明した物面換算の考え方です。このように換算した、試料面における収差量は、

$$\Delta x_o = C_S^{(o)} \alpha_o^3 \quad (24)$$

で与えられます。ここで $C_S^{(o)} = C_S/M$ が、物面換算した球面収差係数です。

一般に球面収差によるビームのボケは、ガウス像面の手前に形成される最小錯乱円の直径として与えられます。この直径を試料面に換算したものが、像のボ

ケを試料面で考えたもの、すなわち空間分解能です。これは下式で与えられます。

$$\Delta d_o = \frac{1}{2} C_S^{(o)} \alpha_{om}^3 \quad (25)$$

ここで α_{om} が、最小錯乱円を構成する電子の初期角度の最大値です。

さて、視野制限モードにおいて、試料面で直径 D の領域を選びたいとします。この選択に際してどれだけの不確かさを許すかは、測定のための目的次第でしょう。たとえば、分析視野の $1/5$ 、すなわち $D/5$ の空間分解能を要求するとしましょう。この場合の取り込み角は、(25) の Δd_o を $D/5$ とおいて α_{om} で解けば、

$$\alpha_{om} = \left(\frac{2D}{3C_S^{(o)}} \right)^{1/3} \quad (26)$$

が得られます。角度制限絞り APD は、ちょうどこの角度まで取り込まれるように径が設定されなければなりません。

数値例として、視野直径を $D = 100 \mu\text{m}$ 、これに対して要求する空間分解能を $D/5 = 20 \mu\text{m}$ としましょう。 $C_S^{(o)}$ は、静電レンズの典型的な値として $C_S^{(o)} = 1000 \text{ mm}$ を仮定すれば、(26) から $\alpha_{om} \simeq 3^\circ$ が得られます。

この例では、まず試料面における取り込み領域が直径 $100 \mu\text{m}$ に設定され、この視野制限を実現するために、取り込み角も $\alpha_{om} \simeq 3^\circ$ に制限されたわけです。この位置と角度の制限は、 $x_o \alpha_o$ 面上の矩形領域として図示されます。これは、この分析モードにおけるインプットレンズのアクセプタンス図に他なりません。

ここまではインプットレンズ側の制限しか考えていませんから、上記のアクセプタンスが系の感度を与えるかどうかはまだわかりません。その判定のためには、インプットレンズとアナライザのどちらの制限が強いかを調べる必要があります。そこで、上の数値例でのインプットレンズのアクセプタンスを、CHA のアクセプタンスと比べてみましょう。

減速がない場合で考えれば、インプットレンズのアクセプタンスは、アナライザ入射面で考えても同じ大きさです。CHA の典型的なアクセプタンスは、空間方向ではスリット幅の数 mm 程度、そして入射角は $\alpha_{1m} \simeq 0.1 = 6^\circ$ の程度でした。これに比べて、インプットレンズの制限は非常に強いことがわかります。

もちろん、これは視野径に依存し、またレンズの収差で変わってくるので、一概には言えません。もし視野径を大きく設定した場合、あるいは球面収差が小

さくなくてレンズ側の取り込み角が増えた場合には、レンズとCHAのアクセプタンスが同程度になることもありえます。

以下では、インพุットレンズの制限の方が強い状況で考えます。この場合、アナライザのアクセプタンスが完全に埋められるということは不可能となります。逆に言えば、レンズの制限を通過できた電子は、すべてアナライザのアクセプタンスに入ることができます。アナライザの制限の強いはずの x 方向であってもそうですから、 y 方向ではなおさらです。

減速を行う場合の、CHAのアクセプタンスと、インพุットレンズのアクセプタンスをCHA入射面に換算したものの計算例を、Fig.23に示します。減速率 γ が大きくなるほど、輝度が低下するぶん、入射ビームのエミッタンス図は膨らんでいきますが、それでもこの例ではアナライザのアクセプタンスをはみ出してはいません。そのエミッタンス図は、試料面では見ればいつも同じですから、感度は γ によらず不変であるわけです。

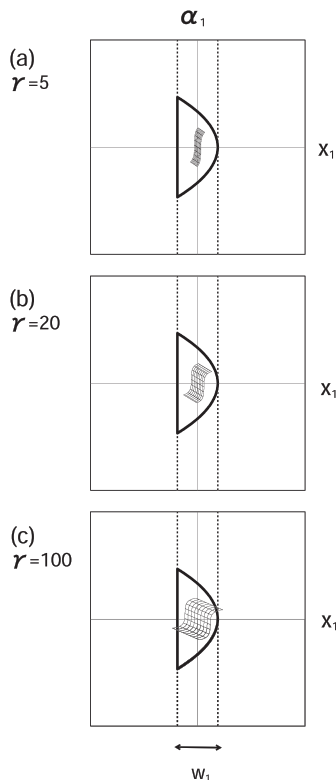


Fig. 23: Variations in the emittance diagram of the beam entering the CHA according to retarding ratio γ .

もし、ビームのエミッタンスとアナライザのアクセプタンスが同程度になる場合は、エミッタンス図の形状を調整して、アナライザのアクセプタンス図にうまく合わせる必要があります。これが、整合をとる作

業です。その際には、インพุットレンズの像倍率 M 、あるいは角度倍率 M_α がうまく制御される必要があります。

図においては、インพุットレンズの収差の影響でエミッタンス図が歪んでいます。しかし、アナライザのアクセプタンス内に納まっている限りは、感度には影響がありません。視野制限を行わない場合もインพุットレンズの収差は効かないのですが、その際はアナライザのアクセプタンスが完全に埋められているためにそうなるのでした。ここでは、理由は異なりますが、収差が寄与しないという事は同じであるわけです。

さて、感度が一定に保たれるのは望ましいことですが、問題はエネルギー分解能です。視野制限を行わない場合は、つねにアナライザのアクセプタンスは埋められていたので、 γ が変わっても、アナライザ単体の絶対分解能 ΔE と相対分解能 $R_A = \Delta E/E_p$ は一定に保たれていました。しかしいまの場合は、アクセプタンスが埋められる領域の大きさが γ とともに増えていきます。

したがって、視野制限のもとでのCAEモードの測定では、分解能が γ とともに劣化していきます。測定の際には、もっとも γ が大きいときに必要な分解能が得られるように、設定がなされなければなりません。

10.6.4 点光源と透過関数

点光源に対しては、ビームのエミッタンス図が面積をもたないことから、いままでのような面光源に対するものとは異なった議論が必要です。

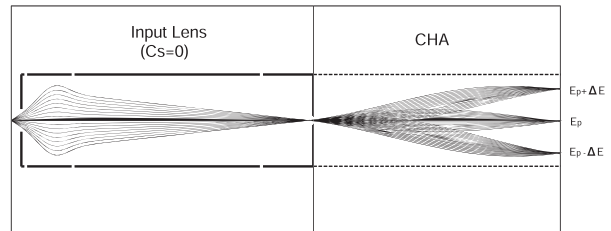


Fig. 24: Energy analyzing system composed of a CHA and an input lens system without spherical aberration.

まず、インพุットレンズが収差をもたない場合を考えます。軸上の点光源に対しては球面収差だけが寄

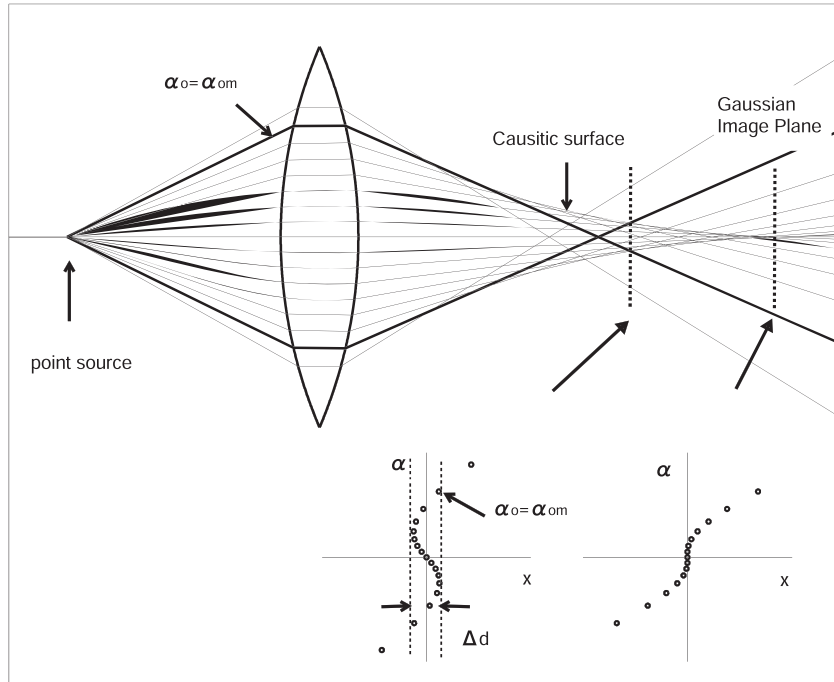


Fig. 25: Spherical aberration of a lens forms a caustic surface for the beam emitted from a point source.

与するので、球面収差が存在しない場合ということです。ある取り込み角 α_{om} まで球面収差が補正され、かつその角度までケラレがないとすれば、Fig.24 のような状況となります。

図のように、球面収差がなければ点光源の像はボケることはなく、アナライザの入り口に点光源があるのと同じこととなります。これは入射スリット幅が0になった場合ですから、エネルギー分解能を決めるのはアナライザへの入射角のみとなります。

この入射角を決めるのは、レンズの角度倍率 M_α です。これを十分小さくしておけば、たとえ試料面での取り込み角が大きくても、アナライザへの入射角は小さく抑えられます。これによって、アナライザの収差は寄与せず、エネルギー分解能はいくらでも小さくできることとなります。

もし、このレンズの球面収差係数 C_S が、 γ を変えても0に保たれて、かつ角度倍率 M_α を十分小さく保つことができれば、試料面での取り込み角 α_{om} は一定となり、感度の γ 依存性は生じないこととなります。しかし、分解能をいくらでもよくできるのですから、減速する必要は実はないわけです。このような状況を不可能にするような物理法則は、なにも存在しません。

現時点においては、レンズは球面収差をもち、しかも球面収差係数 C_S は γ と M_α に依存すると考えるべきです。このような状況のもとで、感度がどのよう

な γ 依存性をもつかを考えてみます。

球面収差をもつレンズによって点光源が結像される時の様子を、Fig.25 に示します。球面収差の作用によって、ビームの電流密度が集中するような軌道の包絡面が形成され、これが火線面 (Caustic surface)、あるいは簡単に火線と呼ばれます。

図では、ガウス像面、およびそれより手前の面における相平面上的エミッタンス図も示しています。光源面でのエミッタンス図は単なる縦方向にのびた直線ですが、これが球面収差の作用によって図のように変形を受けます。(この図では、エミッタンス図を曲線としてではなく、光源からの軌道のとびとびの出射角ごとにドットで表示しています。)

ガウス像面より手前の面上では、火線を外縁とした、強度の集中した領域がつけられます。火線の内部に入ることのできる電子は、光源からの出射角がある値 α_{om} より小さなものであり、それより出射角が大きくなると火線からすばやく遠ざかっていきます。そこで、火線の内部にビーム電流の大部分が含まれることとなります。

さて、アナライザのアクセプタンスの内部に入る電子だけが感度に寄与することは、面光源の場合と同様です。アナライザの入射スリット幅が w_1 であるとき、この範囲に一番多く電子を入れることができるのは、火線の直径がちょうど w_1 となるときです。そこで、レンズのデフォーカス Δf を調整して、うまく火線

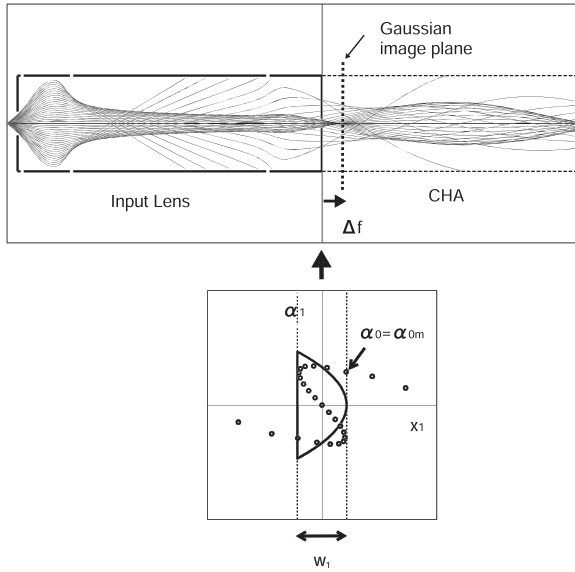


Fig. 26: The optimum amount of defocus of the input lens system which brings the disk surrounded by the caustic surface to the entrance of the CHA.

径が w_1 に一致するようにします。この状態が Fig.26 です。(この図の電子軌道は zy 面上で描いており、レンズ終端面に達することのできた電子はすべて CHA 内部に入射させています。 x 方向においては、 w_1 の幅のスリットを抜けたものだけが CHA に入ります。)

火線内部の軌道をすべてアナライザのアクセプタンスに入れるためには、それらの軌道の角度も問題です。すなわち、相平面上のエミッタンス図の縦方向です。面光源の場合には、アクセプタンスの角度方向にはみ出す軌道を入射角制限によってカットしましたが、今の場合は、レンズの角度倍率 M_α を小さく設定するだけで済みます。これによって、アナライザ入り口でのエミッタンス図としての曲線が角度方向に圧縮されて、うまくアクセプタンスに収まるようになります。

感度を決めるのは、このときの取り込み角 α_{om} です。これはすなわち、火線内部に入ることのできる出射角の最大値です。 α_{om} に対応する火線径は、ビーム全体の開き角が α_{om} であるときの最小錯乱円の径に他なりません。レンズの球面収差係数 C_S が与えられれば、最小錯乱円の直径(ここでは物面換算の必要はありません)を w_1 に等しく置くことで、次式が得られます。

$$\alpha_{om} = \left(\frac{2w_1}{C_S} \right)^{1/3} \quad (27)$$

この式は、感度に対応する取り込み角 α_{om} が C_S によって決定されることを、直接に示しています。

以上は x 方向に関しての議論でしたが、インプットレンズは軸対称なので、 y 方向で考えてもやはり、 w_1 という直径の火線がアナライザ入り口にできているわけです。 y 方向にはスリットによる制限は必要ないものの、ビームに含まれる電流のほとんどは火線内部に集中しているので、 y 方向の取り込み角もやはり (27) で与えられると考えてよいでしょう。(x 方向もやはり同じ理由で、入射スリットがあってもなくても、電流はほとんど w_1 の幅の内部に集中しているわけです。)

この近似のもとで、取り込み角は両方向で同じとなり、 α_{om} と β_{om} がともに (27) で与えられます。そこで、この系の透過関数 T として、次式が得られることとなります。

$$T = \frac{2}{\pi} \alpha_{om}^2 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{2w_1}{C_S} \right)^{2/3} \quad (28)$$

上式によって、もし C_S が γ によらない定数であれば、 T も γ によらなくなります。逆に、もし T が γ 依存性をもつのであれば、それは C_S が γ によって変わるからです。すなわち、点光源に対しての感度 T の γ 依存性は、 C_S の γ 依存性に帰着されるということです。この気持ちを込めて、(28) を次のように書きましょう。

$$T(\gamma) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2w_1}{C_S(\gamma)} \right]^{2/3} \quad (29)$$

(29) において、もし C_S が M あるいは M_α に依存するならば、それも含めて考える必要があります。たとえば、アナライザへの入射角を減らそうとして M_α を小さくすれば、一般には C_S も変わるはずですが、そのような状況では $C_S = C_S(\gamma, M_\alpha)$ として考えます。

われわれのインプットレンズに対しての、 C_S の計算結果はすでに Fig.19 で示されています。この結果は $M_\alpha = 1$ に保った場合であり、この条件を守れば、アナライザへの入射角はアクセプタンスをはみ出しません。 Fig.19 を見ると、 γ の大きい領域をのぞけば、 C_S はほぼ $\gamma^{1/3}$ の依存性になっています。これを (29) に用いれば、この領域での T は $\gamma^{-0.22}$ という依存性をもつこととなります。たとえば、 γ が 20 倍になったときに T がほぼ 1/2 となります。

この C_S の γ 依存性はかなり穏やかな場合であり、実用的な制約のもとで形状が決められたインプットレンズでは、もっと複雑な、起伏のある γ 依存性になることがあります。しかし可能な限り、 γ 依存性を単調なものにするという目的意識のもとで、設計が行われるべきでしょう。

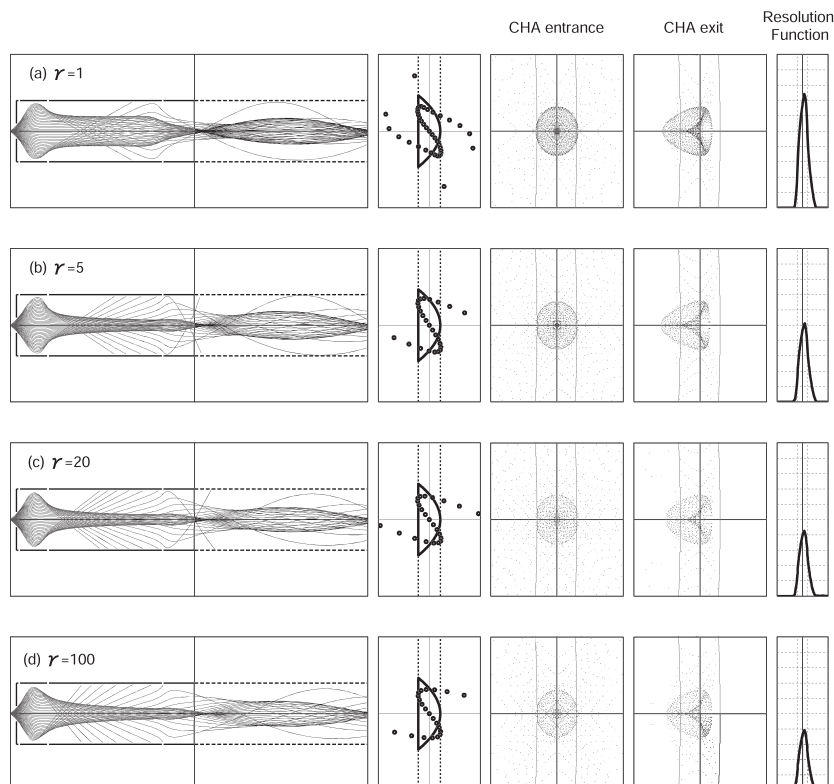


Fig. 27: Electron trajectories in the input lens system, spot diagrams at the entrance and exit of the CHA, and energy spectra for a monochromatic point source. $M_\alpha = 1$ for all cases.

実際に軌道計算によって、 T が決定される様子を Fig.27 に示します。この計算では、 T は分解能関数のピーク値として表示されます。Fig.19 に対応して $M_\alpha = 1$ に保たれており、また火線外部の軌道の寄与が正しく考慮されています。

火線形状はアナライザ入り口では円ですが、これがアナライザの開口収差によって、 x の負の方向に引きずられて変形しています。この変形によって、分解能関数は左右対称とはならず、高エネルギー側にすそが延びた形となります。なお、アナライザへの入射角の大きな軌道ほど大きな収差をこうむるので、火線形状の変化は単に平行移動になるものではありません。

図の下方ほど γ が大きく、よって C_S が増大する結果として、火線内部に寄与できる電子数が減少していきます。しかし、アナライザ入り口での火線の形状自体は同じままであり、かつ M_α が一定であることから、入射角も保たれます。そこで、アナライザの出射面でのビーム形状もやはり変化しません。結局、 γ が変わることによる変化は、火線内部の電子数、およびそれに対応した分解能関数のピーク値の減少だけです。

実用的な装置に対しても、このような計算自体は

難しいわけではなく、報告例もあります。しかし、本項の最初で述べたような、球面収差補正のための努力のほうに報われる度合いが大きいでしょ。もし感度の γ 依存性をなくすという目的だけなら、球面収差を 0 にする必要はなく、球面収差係数が γ によらず一定になりさえすればよいわけです。

電子顕微鏡における収差補正はすでに実用化されていますが、これは最低次数の収差係数を補正するためのものです。分光系においては、ビームの開き角が大きいため、このような摂動論的な収差の扱いはあまり意味がありません。分光系のためには根本的に異なった補正原理が必要であり、まだ実用レベルに至るものはありません。

10.7 まとめ

本章では、電子分光系の分解能と感度に関して、おもにインプットレンズと CHA で構成される系に対して解析を行いました。光源サイズによる違いを中心としてまとめると次のようになります。

一般に分光系のエネルギー分解能は、対象とする電子ビームの空間と角度の広がりを制限することで、

いくらでもよい値が得られる。問題は、分解能と感度との関係である。また、分析の定量性の確保のために、分解能と感度の減速率 γ 依存性が重要となる。

エネルギーアナライザは、ある分解能に対してのビームの受け入れ条件がアクセプタンスとして示される。エネルギー分散方向 (x 方向) では、所定の分解能が実現されるために、アクセプタンスが強く制限される。一方、 y 方向は分解能に影響しないため、一般に大きなアクセプタンスをもつ。この両方向のアクセプタンスを埋める電子の量が、感度を決定する。

分析対象が面光源である場合、アナライザの x 方向のアクセプタンスがすべて埋められた状態において、この方向の感度 G_x が最大となる。これ以上電子を取り込んでも、感度はそのまま分解能が劣化するだけである。インプットレンズは、 x 方向のアクセプタンスをすべて埋めるだけの能力が要求される。それが達成される限りにおいて、レンズの収差は感度に影響しない。アクセプタンスを埋める電子の輝度は、 γ の増大とともに $\gamma^{-1/2}$ の依存性で低下し、これによって $G_x \propto \gamma^{-1/2}$ という関係が生じる。

一方 y 方向においては、アナライザのアクセプタンスが大きいために、インプットレンズ終端に達することのできる電子がすべて、この方向の感度 G_y に寄与する。レンズ終端に達する電子数を決めるのは、レンズ内部のケラレである。ケラレの程度は、もっとも大きい場合で $\gamma^{-1/2}$ 依存性となる。これは輝度法則に由来し、レンズの収差は関与しない。ケラレが $\gamma^{-1/2}$ 依存性を持つ場合、 $G_y \propto \gamma^{-1/2}$ であり、最終的に感度の γ 依存性として、 $G \propto \gamma^{-1}$ の関係が得られる。

視野制限モードでは、所定の空間分解能を得るために、アナライザよりもインプットレンズの側で強い制約が必要となる。そこで、 x 、 y 方向の感度の寄与は同等となる。ビームのエミッタンスがアナライザのアクセプタンス内部に含まれる限りにおいて、感度は一定となり、 γ 依存性は生じない。しかし、ビームのエミッタンスが輝度法則に従って増大するため、かわりに分解能が γ 依存性をもつ。

点光源に対しては、輝度法則は適用されず、アナライザのアクセプタンスにどれだけ多くの電子を入れられるかで感度が決まる。これを支配するのは、インプットレンズの球面収差である。球面収差によって、火線内部に電流密度が集中したビームパターンが形成され、これが適当な大きさにアナライザ入射面に来ようようにレンズのフォーカス位置が設定される。火線の外側の寄与を無視すれば、 x 、 y 方向の感度への

寄与は同等である。点光源に対しての感度、すなわち透過関数 T は、レンズの球面収差係数 C_S によって表される。もし C_S が γ に依存すれば、それが T の γ 依存性を決定する。

10.8 文献紹介

表面分析のために用いられる電子分光装置の原理と構成の解説書として、次のものが代表的です。

[1] 吉原一紘, 吉武道子, 表面分析入門, 裳華房(1997)

[2] 日本表面科学会編, X線光電子分光法, 丸善(1998)

[3] D. Briggs and M.P. Seah, Practical Surface Analysis, 2nd ed. Vol.1, Wiley(1990)

分解能関数とエネルギースペクトルの関係に関しては、次を参照しました。

[4] 後藤敬典, Adel Alkafri, 市川洋, 志水隆一, 表面科学 **27**, 649(2006)

インプットレンズの球面収差係数の減速率依存性および透過関数に関して、次に数値計算例があります。

[5] M. Kato and T. Sekine, Surf. Interface Anal. **21**, 606(1994)