

実験技術

PF アンジュレータビームライン BL-2C の現状 —軟 X 線用不等間隔平面回折格子分光器—

渡邊 正満

フォトンファクトリー, 物質構造科学研究所*

Current Status of the Soft X-ray Undulator Beamline BL-2C —Varied Space Plane Grating Monochromator—

Masamitsu WATANABE

Photon Factory, Institute of Materials Structure Science

A new grazing incidence soft x-ray monochromator has been constructed on the undulator beamline BL-2C of the Photon Factory. The monochromator has been designed to meet the demands for high-resolution soft x-ray spectroscopy. The monochromator has employed a varied space plane grating and a configuration with sagittal focusing and converging beam by an extra-focusing mirror in order to achieve requirement. According to analytical estimation and ray tracing simulation, the high resolving power beyond 10000 can be obtained over the full energy range from 250 to 1400 eV. Preliminary experiments have been done on three points concerning the resolving power, photon flux, and spot size. The results have showed the typical resolving power from 7500 to 10000, the absolute photon flux of the order of 10^{10} photons/s/300 mA/0.02% BW, and the spot size of $0.1 (V) \times 0.9 (H) \text{ mm}^2$ FW at the sample position.

1. はじめに

放射光を用いた発光 (ラマン) 分光実験や電子分光実験等は, 物質の電子基底状態や励起状態, 振動モード, 分子の解離や表面からの離脱など, 多くの研究に用いられてきている。特に軟 X 線ラマン分光や共鳴光電子分光実験では, ビームライン分光器への高分解能化の要求が年々高まっている。また, 今後期待されるであろう自然幅に依存しない様々な分光実験に於いては更なる高分解

能が求められている。それに伴って光学素子研磨や分光器設計に対する技術も上がり, 多くの優れた分光器が建設されている。球面回折格子を用いた Dragon 型分光器¹⁾は, 単純なエネルギー走査機構と高い分解能によって広く採用されているが, エネルギー走査と同時に移動させなければならぬ出射スリットによって, 試料位置でのスポットサイズが最適化できないと言う問題もある。また, SX 700型分光器²⁾は, 一枚の回折格子によ

* フォトンファクトリー, 物質構造科学研究所 〒305 つくば市大穂 1-1
TEL 0298-64-5647 FAX 0298-64-2801 e-mail masamitsu.watanabe@kek.jp

って幅広いエネルギー領域を利用できること、高次光の除去、そして高分解能という点に於いて優れているが、高分解能を達成するために精巧な楕円鏡を必要とするという難しさもある。

近年、回折格子刻線技術の発達により不等刻線間隔回折格子の作成(日立、島津、Carl Zeiss)が可能となり、世界各国の放射光施設で不等間隔回折格子を用いた多くの分光器が建設されるようになってきた。物質構造科学研究所の放射光研究施設(フォトンファクトリー)でも1996年秋に不等間隔平面回折格子を用いた軟X線用分光器がアンジュレータビームラインBL-2Cに建設された。ここでは、このビームラインの設計及び性能(エネルギー分解能、フォトンフラックス、試料位置でのスポットサイズ)について紹介する。

2. 不等間隔回折格子分光器の色々

不等間隔回折格子は、回折格子の刻線間隔が位置によって異なるために、それ自身に光(分光された光)の集光性能が備わっている。また、刻線間隔パラメータを任意に決定できるため、光路関数から算出される収差を小さく押さえることができる。このような優位性によって世界中で多くの不等間隔回折格子分光器が採用されてきている。中でも、Hettrick型^{3,4)}や原田型⁵⁾、小池型^{6,7)}と呼ばれる分光器は初期の段階で設計され、高分解能が確認されている。これらの分光器にはそれぞれ特徴があるが、ここではその詳しい説明を各論文に譲り、次のような観点によって分類してみる。

- a. 定偏角か可変偏角か (constant including angle or variable including angle)
- b. 外部集光型か自己集光型か (extra-focusing or self-focusing)

回折格子の偏角(including angle)は、光の回折効率に影響する。偏角固定の分光器では、高いエネルギー領域で回折効率が小さくなり、低いエネルギーでは二次以上の高次光の強度が強くなる。可変偏角分光器では、これらの回折効率や高

次光の強度に関して改善される。つまり、低いエネルギー領域では偏角を小さくして高次光の影響を抑えることができ、高いエネルギー領域では偏角を大きくすることによって回折効率を稼ぐことができる。さらにこの場合、適切なブレード角を持ったブレード回折格子を用いると回折効率をより改善することができる。このように、可変偏角分光器の方が分光器の性能に関して優位ではあるが、光エネルギー走査機構が複雑になるという欠点がある。

分光器は一般に入射スリットと出射スリットの間に集光素子を持っている。それは鏡であったり、回折格子自体を球面にしたり様々である。ここでは回折格子のみで出射スリット上に回折光の集光を行う分光器を「自己集光型(self focusing)」, 回折格子以外に分光器の中に集光鏡を持つ分光器を「外部集光型(extra focusing)」と呼ぶことにする。外部集光型分光器では、回折光の焦点位置のエネルギー走査による変化を小さくできるというメリットがある。焦点位置の変化が小さい場合、出射スリットを固定しても分解能に対する寄与が小さい事を期待できる。

表1に上記の分類法による分光器の分類を示す。この分類のなかで、ビームラインBL-2Cの分光器は「定偏角、外部集光型」に属する。外部集光型を採用することで出射スリット位置固定の分光器とすることができ、また、定偏角分光器であることから、光エネルギー走査に必要な動きは回折格子の回転のみとすることができる。

Table 1. A classification of the varied space plane grating monochromator. The monochromator of the BL-2C is classified as "constant including angle" and "extra-focusing configuration"

	self-focusing	extra-focusing
constant including angle	Hettrick-type ⁴⁾	BL-2C Hettrick-type ³⁾ Koike-type ⁶⁾
variable including angle	Harada-type ⁵⁾	Koike-type ⁷⁾

3. 光学系

図1に光学系の概略を示す。また、表2に各光学素子のパラメータをまとめて示す。アンジュレータからの光はアパーチャ Ap によって芯を取り出され前置鏡 M_0 に照射される。前置鏡はシリコンのトロイダル鏡で、縦方向には入射スリット S_1 上に、横方向には回折格子後方に集光する。Ap, M_0 , S_1 は水冷されている。 S_1 上に集光された光はスリットを抜け、鏡 M_1 で縦方向に再度集光される。その焦点位置は鏡から6200 mm (回折格子の後方6000 mm) である。 M_1 からの集光されつつある光は M_1 の後方200 mm に置かれている回折格子に照射される。回折格子はシリコン基盤の金コート、ホログラフィックラミナー回折

格子で Carl Zeiss 社製である。1000 l/mm と 2200 l/mm があり、それぞれ250~700 eV, 550~1400 eV をカバーする。回折格子からの回折光は全エネルギー範囲に於いて回折格子から 6016 ± 1.6 mm の位置に集光される。このように焦点位置が ± 1.6 mm の小さな領域に存在するため、出射スリット S_2 は回折格子から6016 mm の位置に固定されている。出射スリット S_2 からの単色光は後置鏡 M_2 と M_3 により、試料上に集光される。 M_2 は球面鏡、 M_3 は円筒鏡で、それぞれ縦方向、横方向に集光する。ここに M_0 及び M_1 , M_3 はサジタル集光配置で用いられている。

分解能が10000を越えるような分光器では、光学素子のスロープエラーが分解能に大きく寄与し

Table 2. Parameters of the mirrors. " r_1 " and " r_2 " represent the arm lengths of the mirrors, and " ρ " and " R " represents the radiuses. The M_0 , M_1 , and M_3 mirrors are settled in the configuration of the sagittal focusing

Mirrors	Vertical focusing (mm)			Horizontal focusing (mm)			Incidence angle α (degree)	Length (mm)
	r_1	r_2	ρ	r_1	r_2	R		
M_0	16000	5000	266	16000	18650	493500	88	180
M_1	10000	6200	267				88	80
M_2				1184	1250	46500	88.5	120
M_3	4000	1000	48.9				88.25	100

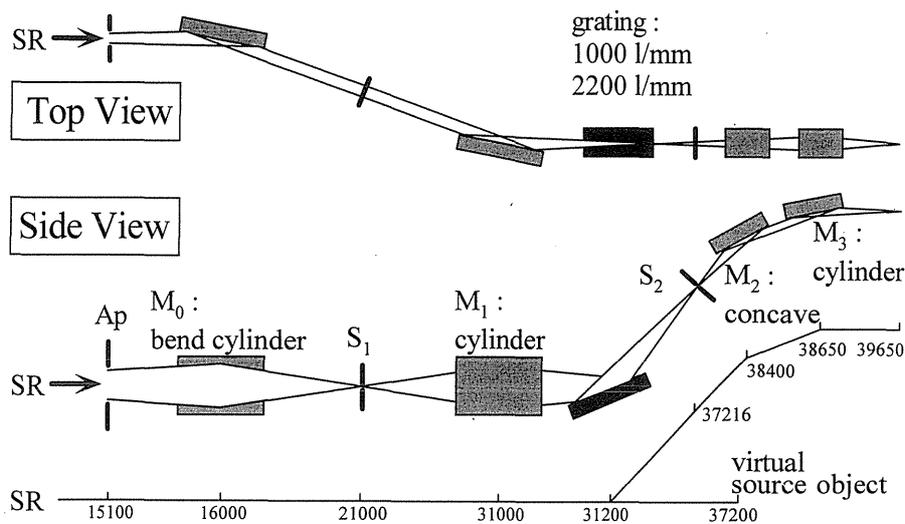


Figure 1. Schematic view of the optical system of the SC-VPGM. Upper and lower pictures show the top view and side view of the beamline, respectively. Lines connecting the optical elements represent light path and focusing configuration. Lowest line and numbers describe the distance from the undulator radiation source. The point at the distance of 37200 mm is assumed as a position of virtual source object for the grating, which is made by the M_1 mirror.

てくる。これらの影響を避けるために、集光鏡にはサジタル集光配置を用いた。タンジェント集光ではスロープエラーによる影響がアームの長さ r に依存するのに対して、サジタル集光ではアームの長さ r と反射角の余弦 $\cos \theta$ に依存し、その寄与は $r \cos \theta$ となる。軟 X 線領域の光に対しては、鏡の反射角が大きいので、 $r \cos \theta$ は r に比して小さな値となる。従って、サジタル集光を用いることによって、スロープエラーによる分解能への影響を抑えることができる。これによって、この分光器の特徴は「サジタル集光を用いた外部集光型の定偏角不等間隔平面回折格子分光器」となる。

4. 回折格子の刻線パラメータ⁸⁾

この分光器は外部集光型であり、分光器の中に回折格子以外に集光鏡 M_1 を含んでいる。しかし、 M_1 の入射及び出射アームの長さはそれぞれ 10 m, 6 m であり、この縮小率 6/10 が 1 に近いことから、 M_1 による像の収差は小さいとして無視することにする。従って、回折格子刻線パラメータの決定には光学素子として回折格子のみを考える。このパラメータ決定には光路関数法 (light path function method) を用いている。光路関数法に用いる座標系等を図 2 に示す。光路関数を回折格子表面の座標 (l, w) で表すと

$$F = F_{00} + wF_{10} + \frac{1}{2} w^2 F_{20} + \frac{1}{2} l^2 F_{02} + \frac{1}{2} w^3 F_{30} + \frac{1}{2} wl^2 F_{12} + \frac{1}{8} w^4 F_{40} + \dots \quad (1)$$

となる。ここに $F_{10} = 0$ は回折の条件を表し、その他の係数 $F_{20}, F_{02}, F_{30}, F_{12}, F_{40}$ は defocus, astigmatism, coma, astigmatic coma, spherical 収差 (aberration) を表している。ここに係数 F_{ij} ($i, j = 0, 1, 2, \dots$) は次のように書ける。

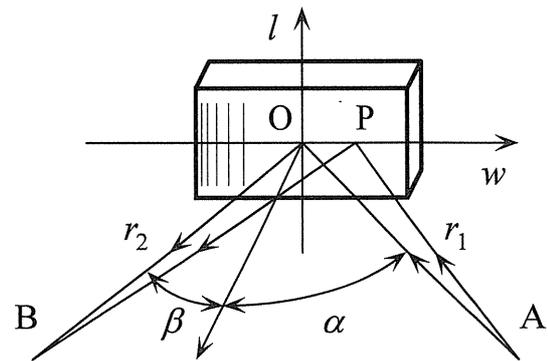


Figure 2. Schematic view of the light path. Point O is the center of the grating. A, B, and P represent a radiation source, an image by the grating, and the position where the photon hits the grating, respectively. Coordinate of P is expressed by w and l .

$$F_{ij} = C_{ij} + M_{ij} \frac{m\lambda}{d_0} \quad (2)$$

C_{ij} は一定な刻線間隔を持つ回折格子による収差であり、 m と λ は回折の次数と波長である。 M_{ij} は回折格子の不等間隔刻線パラメータの存在により導入された係数である。

ここで決定されるべきパラメータは刻線パラメータ b_2, b_3, b_4 と出射アームの長さ r_2 である。回折格子の刻線幅を座標 w で表すとき、

$$d(w) = d_0(1 + b_2 w + b_3 w^2 + b_4 w^3 + \dots) \quad (3)$$

とし、ここに d_0 を回折格子中心での刻線間隔とする。これを用いて光路関数の式(1)を計算し、更に式(2)から係数 M_{ij} を導出すると次のようになる。

$$M_{20} = -b_2 \quad (4)$$

$$M_{30} = \frac{2}{3} (b_2^2 - b_3) \quad (5)$$

$$M_{40} = -2(b_2^3 - 2b_2 b_3 + b_4) \quad (6)$$

$$M_{ij} = 0 \quad (\text{when } j \neq 0) \quad (7)$$

これらの係数を等間隔回折格子によるパラメータ

M_{ij} と共に式(1)に代入すると収差の係数 F_{ij} が次のように求まる。

$$F_{20} = \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r_1} + \frac{\cos^2 \beta}{r_2} \right) - b_2 \frac{m\lambda}{d_0} \quad (8)$$

$$F_{30} = \left(\frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha}{r_1^2} + \frac{\sin \beta \cos^2 \beta}{r_2^2} \right) + \frac{2}{3} (b_2^2 - b_3) \frac{m\lambda}{d_0} \quad (9)$$

$$F_{40} = \left(\frac{\cos^2 \alpha (4 \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)}{r_1^3} + \frac{\cos^2 \beta (4 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta)}{r_2^3} \right) - 2(b_2^3 - 2b_2 b_3 + b_4) \frac{m\lambda}{d_0} \quad (10)$$

ここに r_1 と r_2 は入射，出射アームの長さ， α と β は回折格子への光の入射角と出射角である (図2参照)。

上記の式(8)，(9)，(10)を用いてパラメータを決める。まず，初期条件 $r_1=6000$ mm， $d_0=1/2200$ mm， $m=1$ と式(8)を用いて，ある二つのエネルギー $E_1=500$ eV， $E_2=1200$ eV に於いて defocus: $F_{20}=0$ とする。これによって $r_2=6016.32$ mm と $b_2=3.31563 \times 10^{-4}$ mm⁻¹ が求まる。次にこれらのパラメータと式(9)を用いて，エネルギー $E_3=1150$ eV に於いて $F_{30}=0$ となるように b_3 を決定する。すると $b_3=2.76264 \times 10^{-4}$ mm⁻² となる。最後に，spherical aberration は刻線パラメータの三次の項を考慮しなくても十分に小さいことから $b_4=0$ mm⁻³ とした。これらのパラメータを表3に示す。

5. BL-2C の設置調整

実際の分光器では光学素子の取り付け位置精度等も問題になってくる。取り付け位置精度や光学素子のパラメータのずれによる分解能への寄与は，Yan と柳下によって見積もられている⁸⁾。こ

Table 3. The parameters of the gratings

r_1 (mm)	6000
r_2 (mm)	6016.32
$\alpha + \beta$ (degrees)	173.5
d_0 (mm)	1/1000, 1/2200
b_2 (mm ⁻¹)	3.31563×10^{-4}
b_3 (mm ⁻²)	2.76264×10^{-8}
b_4 (mm ⁻³)	0

これらのエラーは，設計段階ではなく立ち上げ調整作業によって吸収される。集光鏡の焦点距離や鏡のパラメータのずれによるアームの長さの変化は，実際の光を使って調整できるように設計されている。そのために，この分光器の入射スリット位置はビームライン方向に ± 200 mm の範囲で調整可能である。これはビームライン前置鏡の焦点位置を調べつつスリット位置を最適な位置に決定するためである。出射スリット位置も同様にビームライン方向に ± 200 mm 動かすことが可能である。これによって実際の回折格子出射アームの長さを調整することができる。これらの調整は立ち上げ段階に一度だけ行うもので光エネルギー走査を行ったときに再調整する必要はない。また，これらの調整をするためにビームライン各所に光電流ビームモニタを設置してある。アパーチャや入射スリット，出射スリットの各直後に線形導入機に取り付けられた光電流モニタがある。アパーチャ直後のモニタはアンジュレータの芯を取り出すために，入射スリット直後では前置鏡 M_0 がスリット上に焦点を持つように，そして出射スリット直後には M_1 と回折格子の最適化のために取り付けられている。実際の調整作業手順及びその原理は Yan と柳下の論文⁸⁾に詳しく記述されている。

6. エネルギー分解能⁹⁾

エネルギー分解能の見積もりは，ガスの吸収スペクトルを測定することにより行った。用いたガスはアルゴン，窒素，酸素，ネオンである。スペクトルは光イオンを測定し，M3鏡の光電流で規

格化した。

1000 l/mm 回折格子, $S_1=140 \mu\text{m}$, $S_2=20 \mu\text{m}$ の条件で測定したアルゴン $2p_{1/2, 3/2} \rightarrow ns, nd$ 吸収スペクトルを図3に示す。このスペクトルから分解能を見積もるために Voigt 関数を使ってフィッティングを行った。フィッティングは $2p_{3/2} \rightarrow 4s$ ピーク (エネルギー約244.4 eV) のみに対して行った。フィッティングの評価には χ^2 平均を用いている。フィッティングの結果を図4に示す。この図からデータ点とフィッティングした関数がよく一致していることがわかる。このフィッティング結果からの Voigt 関数の中の Lorentzian 成分の半値幅 (FWHM) Γ_L と Gaussian 成分の半値幅 Γ_G はそれぞれ $\Gamma_L=113 \text{ meV}$, $\Gamma_G=24.8 \text{ meV}$ である。この Γ_G が光のエネルギー幅を表すと考えられるため, エネルギー分解能 $E/\Delta E \equiv E/\Gamma_G$ は9840であり, これは Yan と柳下の計算から予想される分解能とほぼ等しい。

次に窒素分子の $1s\sigma \rightarrow \pi^*$ 吸収スペクトルを図5に示す。これは1000 l/mm 回折格子, $S_1=70 \mu\text{m}$, $S_2=15 \mu\text{m}$ の条件で測定された。アルゴンの場合と同様に, 分解能を見積もるために

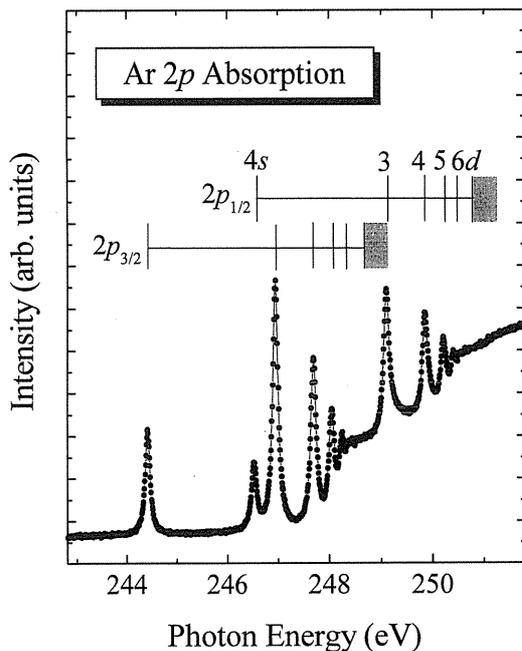


Figure 3. The Ar $2p \rightarrow ns$ and nd photoabsorption spectrum. The $6d$ peaks is clearly seen.

Voigt 関数でフィッティングを行った結果が, 図中に同時に示されている。図中データ点と重なっている実線はフィッティングの結果であり, 一点

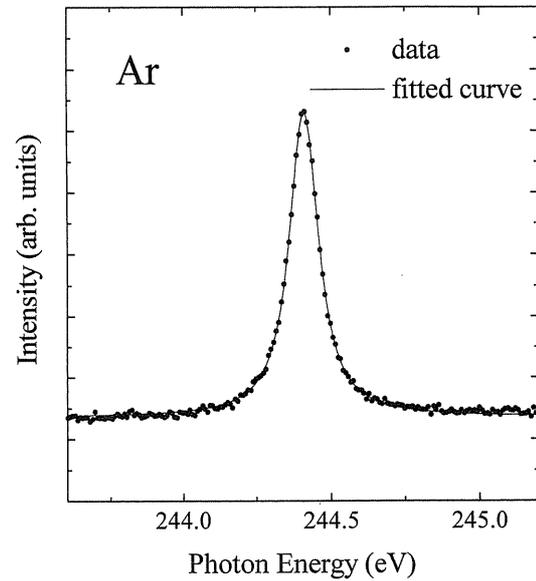


Figure 4. The Ar $2p_{3/2} \rightarrow 4s$ photoabsorption spectrum. The dots and the solid line, which is overlapping with the dots, represent the data and the fitted curve. The fitted curve is calculated with the condition of $\Gamma_L=113 \text{ meV}$ and $\Gamma_G=24.8 \text{ meV}$.

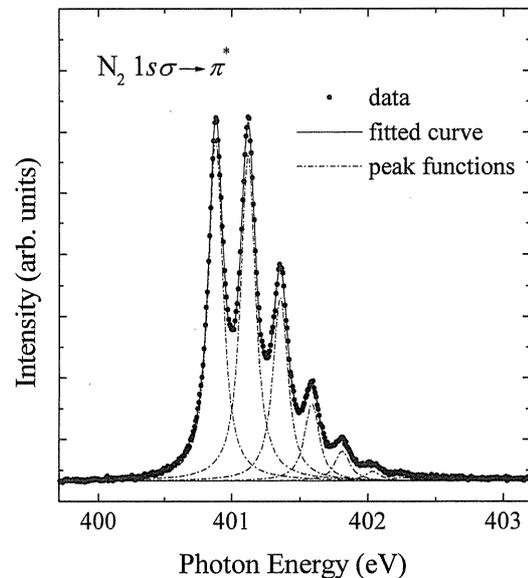


Figure 5. The $1s\sigma \rightarrow \pi^*$ photoabsorption spectrum of N_2 molecules. The dots, solid line overlapping with the dots, and many dash-dot lines represent the data, the fitted curve, and the Voigt functions corresponding to the each vibrational peaks, respectively. The fitted curve is composed of seven Voigt functions. The fitted curve is calculated with the condition of $\Gamma_L=117 \text{ meV}$ and $\Gamma_G=40.9 \text{ meV}$, which are deduced from the graph of the χ^2 value.⁹⁾

鎖線はそれぞれの振動ピークに対する Voigt 関数を示している。これより得られたフィッティングパラメータは $\Gamma_L=117$ meV, $\Gamma_G=40.9$ meV である。これによりエネルギー分解能は9800となる。

回折格子2200 l/mm を用いた酸素の $1s \rightarrow \text{valence}$, Rydberg 吸収スペクトルを図 6 に示す。スリット幅は $S_1=100$ μm , $S_2=15$ μm である。このスペクトルから分解能を見積もるのは困難であるが、計算によるスリット幅からの見積もりによれば、10000程度の分解能であることが期待される。

最後にネオンの $1s \rightarrow np$ 吸収スペクトルを図 7 に示す。これはスリット幅 $S_1=100$ μm , $S_2=15$ μm で測定されたスペクトルである。 $1s \rightarrow 6p$ ピークがはっきりと現れているのがわかる。このスペクトルに対して同様に Voigt 関数でフィッティングを行う。ただし、ここでは $1s \rightarrow 6p$ ピークより高エネルギー側に連続状態が現れているが、これには逆正接関数を用いてフィッティングした。その結果、 $\Gamma_L=303$ meV, $\Gamma_G=117$ meV という結果が得られた。これから得られる分解能は7410である。

上記のようなフィッティングの結果を表 4 にま

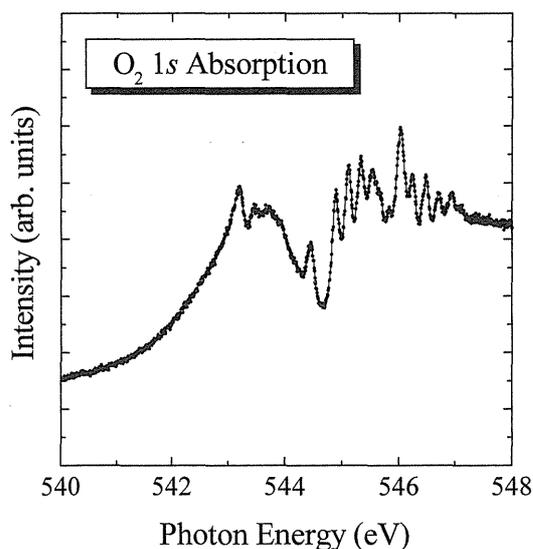


Figure 6. The $1s\sigma \rightarrow \text{valence}$ and Rydberg photoabsorption spectrum of the O_2 molecules.

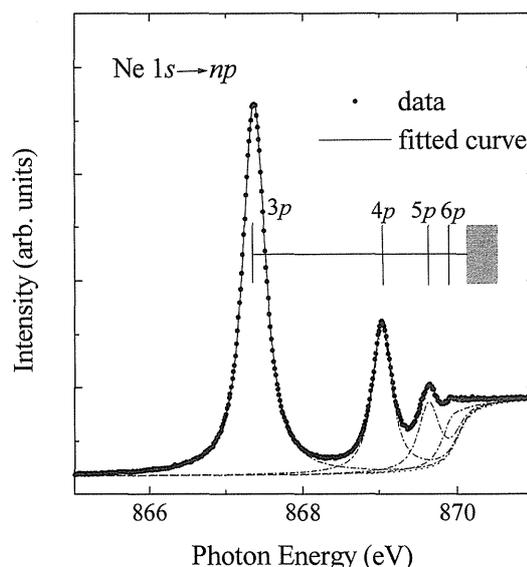


Figure 7. The $1s \rightarrow np$ photoabsorption spectrum of Ne atoms. Dots, solid line, and four dash-dot lines represent the data, the fitted curve, and the each Voigt functions, respectively. The lowest dotted line shows the continuum state expressed by the arctangent function. The fitted curve is calculated using the optimized parameters; $\Gamma_L=303$ meV and $\Gamma_G=117$ meV.

とめて示す。表の中には計算から期待される分解能も同時に示されている。これと測定結果を比べるとほぼ計算通りの分解能が達成されているのがわかる。

7. フォトンフラックス

分解能と同時に分光器の性能として問われるのはフォトンフラックスである。ここでは金フォトダイオードまたはシリコンフォトダイオードを用いて量子効率を考慮することによってフォトンフラックスを測定した。その結果を図 8 に示す。図中にはいくつかのアンジュレータギャップで測定したスペクトルが書かれている。その最大値を結ぶことによりこの分光器のフォトンフラックスがわかる。図中太線はその結果を表している。これにより、回折格子1000 l/mm では $10^{10} \sim 10^{11}$ Photon/s/300 mA/0.02%BW, また2200 l/mm では $10^9 \sim 10^{10}$ Photon/s/300 mA/0.02%BW のフォトンフラックスが得られていることがわかる。これは、鏡の反射率や回折格子の回折効率を考慮し

Table 4. The results and the condition for the estimation of the resolving power. The Γ_L , which is the width of the Lorentzian function, represents the lifetime broadening. The Γ_G , which is the width of the Gaussian function, is assumed to be the width of the monochromator transmission function.

samples	photon energy (eV)	grating (l/mm)	slit widths S_1 - S_2 (μm)	Γ_L (meV)	Γ_G (meV)	resolving power	expected value ⁸⁾
Ar	~244	1000	140-20	113	24.8	~9840	~10000
N ₂	~401	1000	70-15	267	40.9	~9800	~10000
Ne	~867	2200	100-15	303	117	~7410	~7500

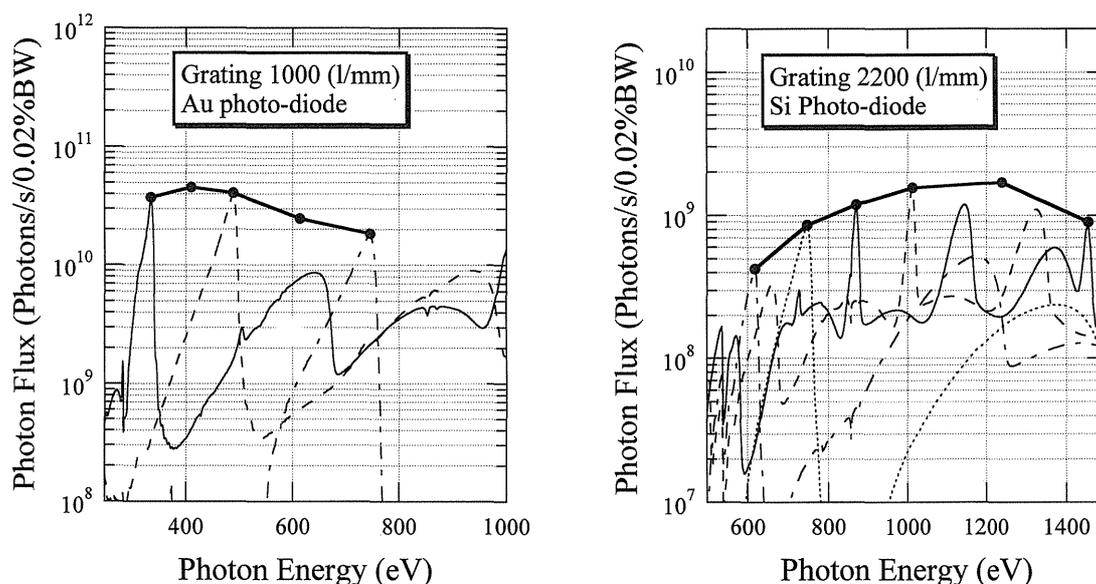


Figure 8. Absolute photon flux for gratings of (a) 1000 l/mm and (b) 2200 l/mm. Many lines represent the spectra of undulator radiation corresponding to various gaps of the undulator. The photon flux curves are interpreted as a linked lines between the maximum points of each spectra. In the case of the 1000 l/mm grating, the typical photon flux is in the range of 10^{10} photons/s/0.02% BW. The spectra of the 2200 l/mm grating show the photon flux of about 10^9 photons/s/0.02% BW. The lower photon flux in the case of the 2200 l/mm is due to Carbon and Oxygen contaminations on the surface of the Si photo-diode.

て得られるフラックスよりも一桁以上程度小さい値である。このことは、計算⁸⁾がPFリングの低エミッタンス化後のパラメータを用いていること、前置鏡 M_0 の前のアパーチャ A_p の大きさが測定時の5倍程度としていること等が原因であると考えられることができる。

8. スポットサイズ

様々な測定には試料位置でのスポットサイズが重要になる場合がある。たとえば発光分光実験では、スポットサイズがスペクトルの強度や分解能に直接影響を与える。そこでマイクロメータに取

り付けられたナイフエッジとフォトダイオード(図9)を用いて試料位置でのスポットサイズを測定した。この測定により得られたスポットサイズは縦横全幅 $0.1 \times 0.9 \text{ mm}^2$ である。このスポットサイズは回折格子1000 l/mm, スリット幅 $S_1 = 100 \mu\text{m}$, $S_2 = 30 \mu\text{m}$ の条件で測定した。レイトレース計算⁸⁾によると、スポットサイズは250 eVの光で入射出射スリットとも全開の条件で $0.01 \times 0.5 \text{ mm}^2$ FW である。レイトレース計算と測定とでは条件が違うため正確な議論はできないが、このスポットサイズの違いは、ベント機構を持つ前置鏡 M_0 のベント調整不足と後置鏡 M_2 ,

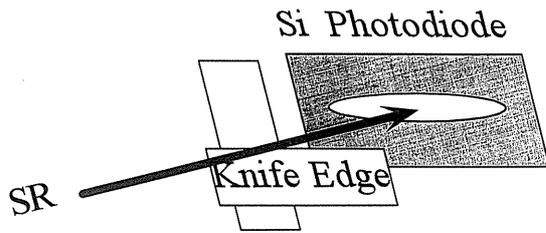


Figure 9. A configuration of the spot-size measurement. The knife edges can smoothly move using micrometers.

M_3 の位置微調整の不足が原因であると考えることがができる。

9. 終わりに

フォトンファクトリーのアンジュレータビームライン BL-2C に軟 X 線用不等間隔平面回折格子分光器が建設された。1996年秋のビームタイムの立ち上げ期間中に広いエネルギー範囲でエネルギー分解能10000が達成されていることが確認された。分解能10000を越えることができる分光器は今までに報告されたこともある。しかし、ここでは吸収スペクトルから分解能を算出する術を持っておらず、実際には10000に達していなかったと考えられる。今回、この我々の分解能評価では吸収スペクトルの数値解析から分解能を見積もった。そこでは同時に内殻正孔寿命効果によるスペクトルの幅も得られるが、その値は過去に EELS で得られている幅よりも小さい。このことから、今回の評価値が過大評価した値ではないことがわかる。また、その寿命効果の幅は Elettra の分光器に於いて得られている幅ともよく一致している^{10,11)}。同時に彼らは、BL-2C 分光器と同程度のエネルギー分解能を達成していることを報告している。今後、これらの分解能10000を越える分光器を用いた研究成果が世界中から報告されるで

あろうと思われる。

このビームライン BL-2C は、1998年春から一般ユーザーへの公開が予定されている。フォトンファクトリーでは、現在世界最高分解能を達成しているこのビームラインを用いてユーザーがすばらしい scientific output を出すことを期待している。

最後に、この分光器の立ち上げに当たって、PF スタッフの方々や三菱電機サービスの方々にも多大な協力をいただいたことを、この場をお借りして感謝いたします。

参考文献

- 1) C. T. Chen: Nucl. Inst. Meth., **A256**, 595 (1987).
- 2) H. Petersen: Opt. Comm., **40**, 402 (1987).
- 3) M. C. Hettrick, J. H. Underwood, P. J. Batson and M. J. Eckart: Appl. Opt., **27**, 200 (1988).
- 4) M. C. Hettrick: Appl. Opt., **29**, 4531 (1990).
- 5) M. Itou, T. Harada and T. Kita: Appl. Opt., **28**, 146 (1989).
- 6) M. Koike, R. Beguiristain, J. H. Underwood and T. Namioka: Nucl. Instr. and Meth., **A347**, 273 (1994).
- 7) M. Koike and T. Namioka: Rev. Sci. Instrum., **66**, 2144 (1995).
- 8) Y. Yan and A. Yagishita: KEK Report 95-9 (1995).
- 9) M. Watanabe, A. Toyoshima, Y. Azuma, T. Hayaishi, Y. Yan and A. Yagishita: *Proceedings of SPIE's 1997 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation: SPIE's 42nd Annual Meeting* (1997).
- 10) D. Cvetko, L. Floreano, R. Gotter, M. Malvezzi, L. Marassi, A. Morgante, G. Naletto, A. Santaniello, G. Stefani, F. Tommasini, G. Tondello and A. Verdini: *Proceedings of SPIE's, 1997 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation: SPIE's 42nd Annual Meeting* (1997).
- 11) K. C. Prince, R. R. Blyth, R. Delaunay, M. Zitnik and J. Krempasky: *Proceedings of the 6th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation* (1997).