

〔研究〕

超軟 X 線ビーム絶対強度測定法の開発

Development of a Technique for the Absolute Measurement of Ultra-Soft X-ray Beams

齋藤 則生 鈴木 功
N.SAITO I.H.SUZUKI

Several techniques have been investigated as methods for the measurement of absolute intensities of ultra-soft X-rays. Among them the technique using a multiple electrodes ion chamber has been adopted here, which needs an index constant on multiple photoionization of rare gas atoms. This constant, called γ -value, indicates the average number of electrons emitted from an atom having absorbed a photon. The γ -values were measured using monochromatized synchrotron radiation and a time-of-flight mass spectrometer. The ion chamber has been made, which is cylindrical and 1.3m long. The monochromatized synchrotron radiation enters the chamber at position off the central axis and the produced ions are collected with electrodes on the opposite side to the photon entrance. The performance tests showed ion-current saturation curves with high quality. The obtained photon intensity ranges from 10^7 photons s^{-1} to 10^9 photons s^{-1} at the aperture of 1mm ϕ with the ring current of 100mA.

§ 1 はじめに

X線の標準は約 8keV 以上で、X線管を用いて「照射線量」という単位で確立されており、計量法トレーサビリティ制度、あるいは依頼試験制度で一般のユーザーに、標準が供給されている^{1,2)}。供給された標準によって、一般の人達は放射線に被曝していないこと、あるいは、ある試料などにこれだけ放射線を照射したことなどの定量的根拠を得て、安全な社会生活あるいは技術開発の進歩を得ている。田無からつくばへ移転するのを機に、より低エネルギーの光子線についての標準の研究を行うことを目的の一つに電子蓄積リング (TERAS) が建設された。リングからのシンクロトロン放射 (放射光) は、強度、波長分布、方向分布などが Schwinger の理論によって予言できるので、広い波長範囲にわたる標準光源の資格を備えており、米国 NIST、独 PTB でもその特徴を生かした研究を実施している³⁻⁹⁾。

本稿において、「超軟 X 線」は、光子エネルギー

0.1 ~ 1.2keV 程度の軟 X 線を指しており、既に確立してある照射線量 X 線のうち、20keV 程度以下を「軟 X 線」と称しているため、区分けを明確にするため、それより軟らかい X 線 (エネルギーが低い) の意味で「超軟 X 線」と呼んでいる。このような呼称は、どのような分野で用いられるかによって、相当異なっており、数 keV でも硬 X 線 (エネルギーが高い) と呼ぶ専門領域もある。従来より、高温プラズマの診断や天体観測における軟 X 線の精密計測の重要性は強く認識されているが、最近の放射光やレーザープラズマ X 線源の進歩により、軟 X 線の利用領域が格段に広がって来ており、LIGA 等の微細加工プロセスや生体への照射効果、軽元素蛍光 X 線分析、X 線顕微鏡等に関して、定量的評価のために、軟 X 線の精密計測や絶対強度測定的重要性が高まっている^{10,11)}。

超軟 X 線領域では、数 keV 以上の X 線とは物質との相互作用の大きさ、特色などが相当異なり、光子線強度の標準としては、フルエンス (あるいはフルエンス率) [単位面積を通過した光子の数 (あるいは

KEY WORDS : 単色軟 X 線, 絶対強度測定, 多段型イオンチェンバー, 希ガス多重イオン化, 平均荷電数

その時間微分)]を用いる。従来は薄膜窓型比例計数管で当該エネルギー領域のフルエンス率を測定していたが、比例計数管では、ガス中で電子雪崩を起こさせて、1光子 → 1出力パルスの変換によって、光子数を求めるので、電子雪崩の消滅時間より早い繰り返しの入力軟X線では(10⁴/秒以上)、正確な計測は不可能であった¹²⁾。従って、高いフルエンス率の軟X線の正しい絶対強度を知るには、1光子 → 1パルスの変換とは異なるもので、入射光子数と出力の対応関係が明確なものが必要である。一方真空紫外線領域の光子ビームの絶対測定法としては、30年程前にダブルイオンチェンバー法が提案され、希ガスをを用いて確度の高い計測法として用いられている^{13,14)}。これは、1光子 → 1イオンに変換して、入射光子数の絶対値を求めるものである。ところが軟X線領域では、原子の内殻軌道の電子をイオン化出来るので、引き続くオージェ過程で多価イオンを発生させてしまう。つまり光子・イオンの1:1対応は成立しなくなってしまっている。1光子が何価のイオンを発生させるかが解れば、ダブルイオンチェンバー法が使える筈であるが、我々のスタート時点では、そのようなデータは報告されていなかった。従って、そのようなデータを求めるため、原子の軟X線による多価イオン化の挙動を調べることで研究を開始した。その他の絶対計測法としては、電子・イオン同時計数法が考えられる¹⁵⁾。これは、光イオン化によって、イオンと電子が生じることに着目し、二つの荷電粒子を同時計数し、それぞれを個別に測定した信号量との掛け算、割り算を行うことによって、検出効率を消去できることを利用している。しかし、希ガス濃度と相互作用体積の正確な測定が難しく、現状では高確度の測定は不可能である。また、軟X線ビームを薄片に全吸収させて、そのワット数を測るクライオカロリメトリックな手法もあり、PTB では、標準として確立している^{8,9)}。しかし、パワーとして測定する(エネルギーフルエンス率)ので、ビーム強度が高くないと信号が熱雑音にうもれてしまい、誤差が大きくなる欠点があるので、当所の軟X線用ビームラインには、現在までの段階ではあまり適さなかった。

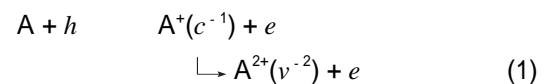
本研究においては、超軟X線ビームの絶対強度(フルエンス率)を多段型イオンチェンバーを用い

て決定したが、第2節において、絶対測定に必要な定数の物理的意味や求め方を説明する。第3節では、放射光を単色化して得られる軟X線ビームの性質の検討にふれ、第4節で、多段型電極を有するイオンチェンバーの構造と特性を述べる。第5節で、絶対強度の求め方を説明するとともに計測結果を考察し、第6節で今後の展望についてふれる。

§ 2 希ガス原子の光イオン化における平均荷電数

本研究では超軟X線の絶対強度を測定するのに、イオンチェンバーによる方法を採用した。イオンチェンバーは、ガスを高い圧力で導入して用いる場合と低い圧力で用いる場合の二通りある¹⁵⁾。高い圧力で利用する時にはガスのW値(イオン・電子の対を1個生成させるのに必要なエネルギーの平均値)、低い圧力で用いる時には値(1光子を吸収した原子が放出する電子数の平均値)がそれぞれ必要である。W値、値共に測定データがこのエネルギー領域ではないので、それらの値を知る必要がある^{16,17)}。W値を得るためには軟X線の絶対強度の値が必要なので、現状ではW値を正確に測定することは非常に難しい。しかし値は軟X線の強度が解らなくても、生成ガスイオンの荷電状態を測定できれば求めることができるので、値を利用した軟X線計測法を開発することにした。

原子が軟X線を吸収すると、多くの場合以下に記すような過程によって、多価イオンが生ずる¹⁸⁻²⁰⁾。



ここで、cは内殻電子軌道、vは価電子軌道を表す。内殻軌道の電子がイオン化された後、内殻空孔を埋めるために、Auger遷移が起こって2価イオンに変化してゆく。また初期段階でイオン化される内殻軌道が深い場合には、Auger遷移後の状態は、浅い内殻軌道に空孔をもつ場合が多くなるので、さらに、第二段階のAuger遷移が起こり、3価あるいは、それ以上の多価イオンへと変わって行く。また、このエネル

ギー領域の光子では、一度に2個の電子を放出する光イオン化も起こりうる。勿論価電子1個だけをイオン化する過程も少ない割合ながら、無視出来ない程度には生じている。このため、平均荷電数(値)を正確に求めるために、飛行時間型質量分析計を、パルス電場モードで用いて、希ガス原子のイオン生成分岐比を数百 eV 領域で測定し、それより値を計算した。

飛行時間型質量分析計の衝突領域に、ノズルから希ガスを噴出させる¹⁸⁾。電総研 TERAS からの放射光をグラスホッパー型分光器により分光して単色軟X線を得、それをガスノズル、分析計と直角に衝突領域に入射させる。パルス発生器からの幅数マイクロ秒、周期数十マイクロ秒の短形状の電圧 100V を波形整形回路を通して、衝突領域に印加する。この電界によって、軟X線を吸収して生じたイオンを、片側のドリフトチューブに押しやる。長さ 140mm のドリフトチューブは無電界にしておき、イオンを数マイクロ秒飛行させる。ドリフトチューブを通り抜けたイオンは、マイクロチャンネルプレートで検出される。衝突領域への印加電圧と同期したパルスを、時間差波高変換器のスタート信号にし、イオン検出器からの信号を増幅して TAC のストップ信号にする。TAC の出力をマルチチャンネル分析器でデジタル化し、一定時間のデータ取得後に、それをコンピュータに送る。それによって、飛行時間スペクトルが得られ、それぞれの価数のイオンのピーク強度から、イオン生成の分岐比が求まる。各エネルギーの軟X線について、分岐比から値を得た。これらの測定は、Ne, Ar, Kr, Xeについて 50eV - 1.2keV で行った。Fig.1 にXeの値の軟X線エネルギーへの依存性を示す¹⁵⁾。予期していたように、内殻のイオン化エネルギーで値のジャンプが起こり、4d領域では2.0を越え、3d領域では4.5近傍の値になっている。印で示した Holland らのデータから求めた値は 150eV 以下では本研究の値とよく一致するが、200eV 以上で本研究のものより小さくなってしまふ²¹⁾。このような傾向は、他の希ガス原子についても同様に見られ、後述するように、入射軟X線の純度に難点があったのであろうと思われる。

飛行時間スペクトルの測定では、パルス引出型計測を行ったが、イオンの捕集効率は、衝突領域にお

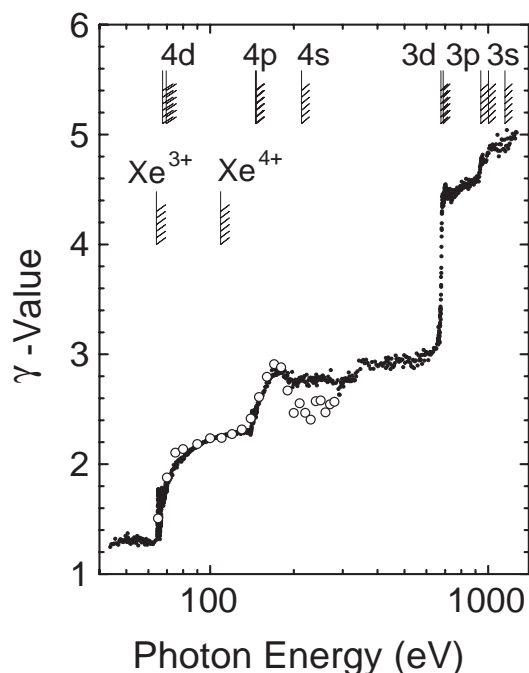


Fig.1 γ -values of Xe in the soft X-ray region.

ける浮遊電界のために、イオンの荷電状態に依存する恐れがある。また引き出しパルス幅も捕集効率の違いに影響する恐れがあり、残留ガスとの衝突による損失も効いてくる可能性がある。それらが無視できる程度に小さい実験条件を見出すため、イオン分岐比のガス圧依存性、パルス幅依存性、パルス周期依存性を調べて、最適条件を見出した¹⁸⁾。Xeの場合、ガス圧(主チャンバーのもの)で、 1.5×10^{-5} Torr 以下、パルス周期は、80 マイクロ秒、パルス幅は、10 マイクロ秒であり、この際には、数 10eV 領域での他グループの分岐比データとよい一致が得られた。広帯域連続光から分光器によって単色光を得る放射光ビームラインでは、必要な一次光より長波長の散乱光と短波長の二次光が必ず混入してくる。散乱光については、薄膜金属フィルター (Al, In等) によって除去するとともに、高次光成分は、電子蓄積リングの低電子エネルギー運転を行って低減化を図った。750MeV の TERAS の臨界光子エネルギーは 200eV 近傍であり、それを 300 - 500 MeV にすることにより、数 100eV 領域の高次光を数桁減少させることが出来た。これらの実験的検討を経て、数 100eV 領域において精度の良い希ガス原子の値が求めたが、絶対測定において利用するのに都合良い原子を選ぶには、以下の事項を考慮しておくことが重要である。

(1) 値のエネルギー依存性が小さい。(2) 光吸収断面積のエネルギー依存性が小さい。(3) 光吸収断面積が大きい。(4) 値データの精度がよい。

以上のことを考えると、Xeは高価ではあるが、断面積が大きいので内殻イオン化しきい値近傍を除いて広いエネルギー範囲で用いる原子であり、Arは、L殻しきい値近傍のエネルギーを除いて広く用いるものである。今回の絶対測定においては、主に、Arを充填ガスとして用いたが、Arの値のエネルギー依存性をFig.2に示しておく¹⁵⁾。

§3 単色超軟X線ビームの特性の検討

回折格子分光器から得られる単色超軟X線ビームの空間的分布を測定するために、ピンホール駆動機構を製作し、それを空間的に走査して、強度分布を測定した。また、検出器としては、比例計数管を用い、強度の調整用に、フィルター設定器を使用した。フィルター設定器には、4種類の薄膜をセットすることができ、通常ベリリウム、アルミニウム、マイラー、およびインジウムの薄膜がセットされている。これらの薄膜は、主に軟X線ビームのスペクトル純度を向上させるために用いるが、必要とされている軟X線エネルギーによって使い分ける。ベリリウ

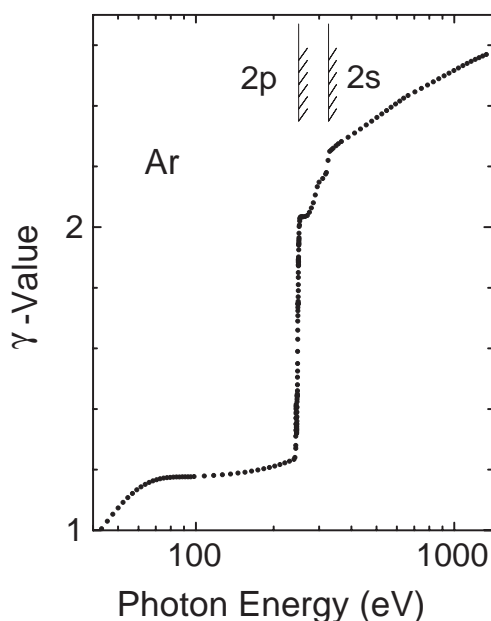


Fig.2 γ -values of Ar in the soft X-ray region.

ムは、600eV以上、アルミニウムは、300~600eVおよび70eV以下、マイラーは、300eV以下、インジウムは、400eV以下で用いると有効である。

ピンホール駆動器のピンホールは50 μm の直径を有しており、ピンホールの位置はコンピュータによって上下左右制御される。軟X線ビームの微細領域の強度分布を調べるために、軟X線ビームの縦方向と横方向の強度分布を測定した(Fig.3)。黒丸または黒四角で示したのは測定強度で、実線で示したのは計算によって得られた強度分布である。計算は、光線追跡法を用いて計算した。つまり、電子蓄積リングの電子ビームを光源として、2万本以上の光線が、検出器のどの位置に到達するかを計算する。電子蓄積リングの電子ビームの形状は、ガウス分布を仮定し、横、縦、奥行き方向の分布は、 $s_x=2\text{mm}$ 、 $s_y=1\text{mm}$ 、 $s_z=1\text{mm}$ と見積って、M0ミラー、M1ミラー、コドリングスリット、回折格子、後置鏡での反射による強度分布について、計算を行った²²⁾。光の波長は0次光であり、回折格子で鏡面反射したものを取り扱った。

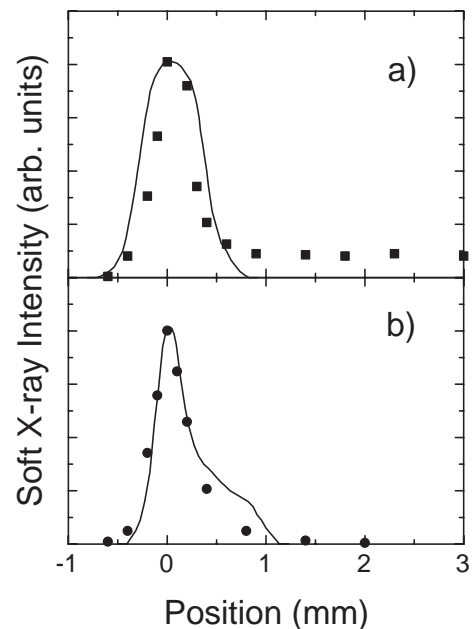


Fig.3 Spatial distributions of monochromatic soft X-rays from the grazing incidence monochromator. The distribution under the horizontal direction is shown in the upper part, and that under the vertical is shown in the lower. Solid circles and squares denote experimental data, and solid lines indicate calculated results.

実験は、分光器の入射・出射スリットともに $20\mu\text{m}$ 、 400eV の軟X線エネルギーに対して、 $50\mu\text{m}$ の直径のピンホールを上下左右に動かし、同時に比例計数管を用いて軟X線の強度変化を測定した。強度分布の幅はほぼ計算値を再現している。しかし、横方向の分布は、かなりテールを引き広がっていることがわかった。これは、分光器内のミラーの収差および設定のずれによるものと考えられる。横に広がっている部分は、絶対強度測定に大きな誤差を生じさせる可能性があるため、取り除く必要があり、光学系の再調整を行い、且つダイヤフラムを設置することで改善した。

超軟X線ビームのスペクトル純度を向上させるために、前述のように、電子蓄積リングの低エネルギー運転をすとか、薄膜フィルターを用いる方法などがありうるが、強度が減衰してしまうことが大きな欠点である。強度の減少を小さくして高次光を抑える方法として、ミラー反射を使用することを試みた (Fig.4 参照)。本装置は、ミラーの高次光に対する反射率が一次光に比較して小さいことを利用して、分光器から得られた超軟X線をミラーにより2回反射させることにより、出射超軟X線に含まれる高次光成分を取り除くものである。超高真空チャンバー ($560\text{mm}\times 195$) に2枚のミラー ($30\text{mm}\times 120\text{mm}\times 15\text{mm}$) を設置することができ、それぞれ光軸に対してミラーの角度を1度から10度まで 0.05 度の分解能で動かすことが可能である。ミラーの上下間隔は、

20mm であり、光軸方向に対して、下流のミラーは 300mm 移動でき、上流ミラーは 25mm 移動できる。

ミラーの反射率の計算を Henke のデータを用いて行ったところ²³⁾、 110eV の軟X線に対し、Auミラーで9度の入射角に設定すると、二次光は100分の1になるが、一次光は35%反射してくることが解った。また 400eV で、 SiO_2 ミラーの 2.4 度の入射角で、二次光の100分の1に対し、一次光は40%の効率を得られた。他のエネルギー、入射角度での計算によって、 150eV よりも高いエネルギーの軟X線に対しては SiO_2 よりなるミラー、それよりも低いエネルギーの軟X線に対してはAuをコートしたミラーが適していることがわかった。

シミュレーション計算結果の妥当性を調べるために、高次光減衰器を軟X線ビームラインに接続し、その性能を比例計数管を用いてテストした。それによると、数百 eV 領域の軟X線に対して、数%オーダーの高次光が混入していたが、 SiO_2 ミラーを 2.5° にセットすれば、 350eV 以上では、高次光成分は、無視出来る程度に減少させることが出来た。 3.7° にセットすれば、 200eV 以上で高次光を消去できた。Auミラーを用いた場合には、 4.5° の角度で、高次光成分を1%以下に出来たが、1次光も相当弱くなってしまった。これらの結果は、ミラー反射率データからの計算結果とほぼ一致するものであった。なお、「5節」の計測の結果は、この高次光減衰器の設置以前のデータであることを付記しておく。

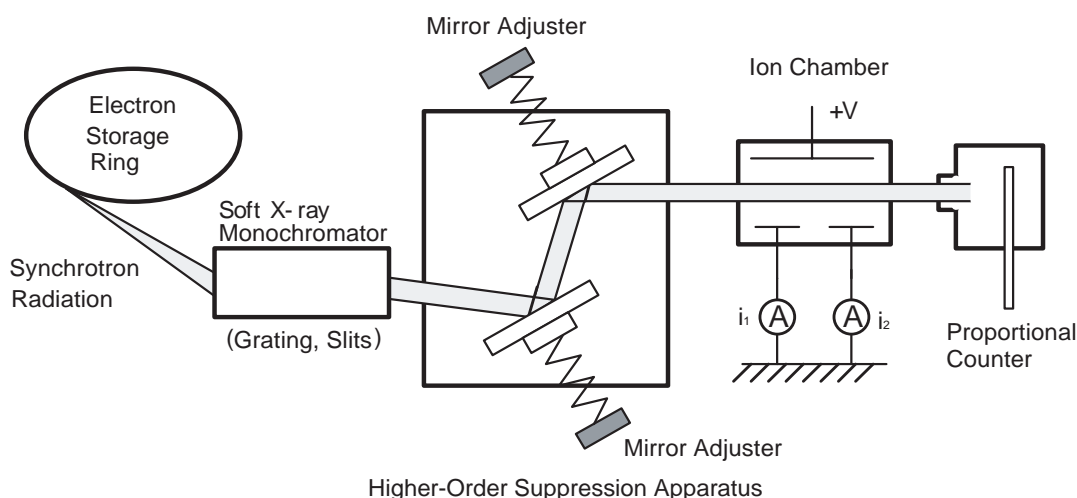


Fig.4 Schematic illustration of the apparatus for higher order suppression, combined with the monochromator, the multiple electrodes ion chamber and the proportional counter.

§4 多段型イオンチェンバーの製作と性能

超軟X線ビームの絶対強度の計測には、イオンチェンバーおよび電極値を用いた測定手法を採用し、イオンチェンバーおよびイオン電流測定システムを製作した²⁴⁾。イオンチェンバーには長さの異なる2組の電極があり、入射軟X線の強度やチェンバーに充

填する気体の圧力の違いに対応できるように工夫してある。Fig.5 に製作した多段型イオンチェンバー（通称ダブルイオンチェンバー）の概要を示す。円筒の軸はずし位置から軟X線を入射させ、生じたイオンは、おおよそ対称の位置に設置した棒状電極で捕集する。このような電極配置をとるのは、光イオン化領域にかかる電界をなるべく小さくし、放出電子が電界によって得る運動エネルギーを小さく抑え込むためである^{14,25)}。電極は6つに分割されていて、軟X線光路のそれぞれの領域で生じたイオンを検出できるようになっている。最上流と最下流のものは端効果で電場が歪むのを抑えるために付加した。第2，第3の電極或いは第4，第5の電極でのイオン量から軟X線強度（フルエンス率）を求めることができる（後述の(2)式参照）。全体の測定システムを Fig.6 に示す。ガス圧の測定には、隔膜型真空計を用い、その安定化には自動制御器を使っている。上流側の光子モニターは Ni メッシュに金蒸着したものを使用し、イオンチェンバー窓には、VYNS 薄膜を設置し、散乱光除去には、適宜金属薄膜フィルターを光路に

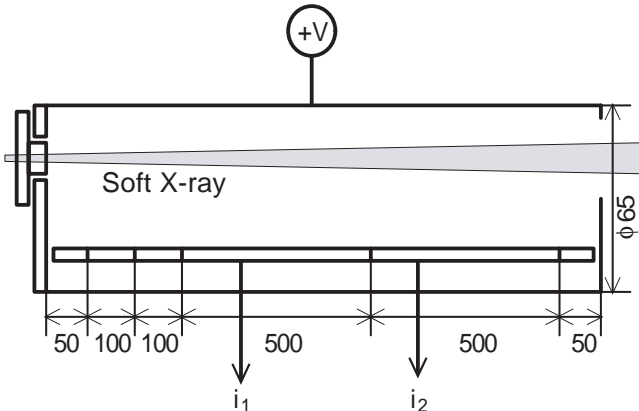


Fig.5 Multiple electrodes ion chamber. Digit values are denoted in units of mm.

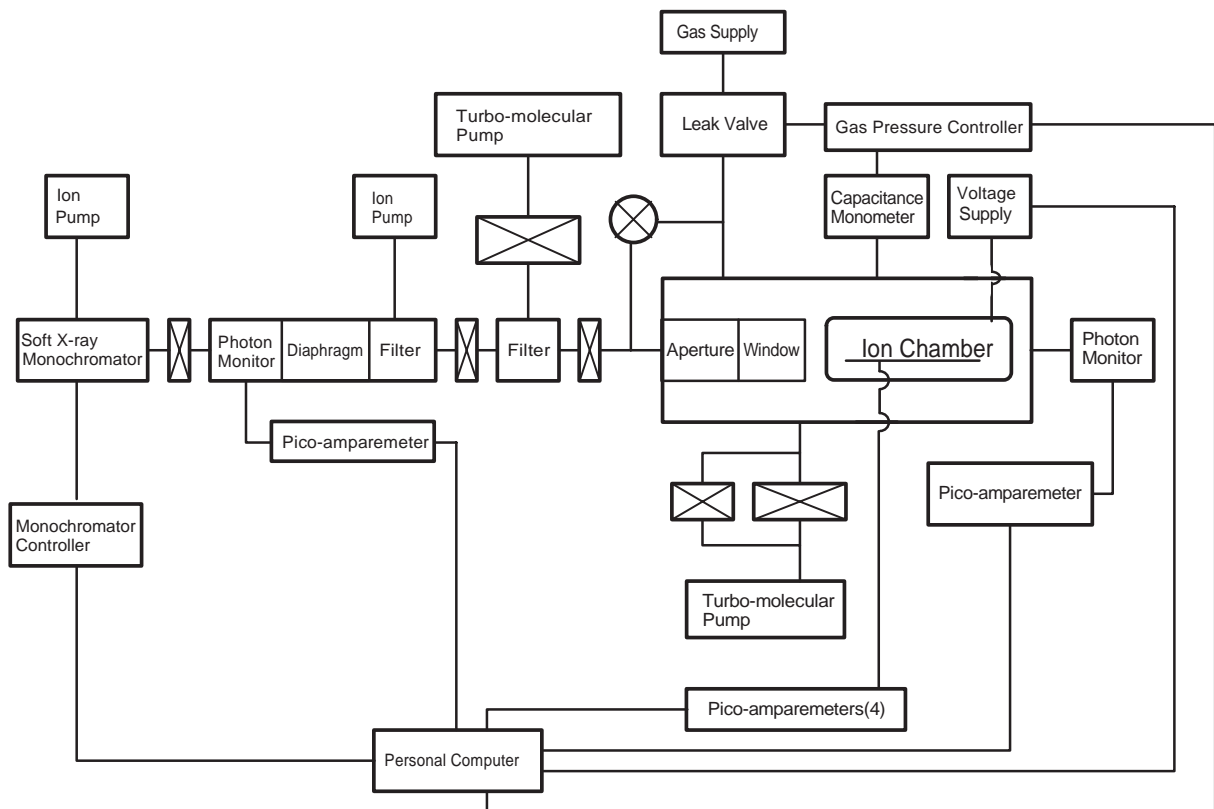


Fig.6 Measurement system for photoion currents using the ion chamber.

いれている。イオン電流の計測にはピコアンペアメーターを4台使い、第2～第5の電極からの微小電流を検出し、パーソナルコンピュータに測定値を取り込んでいる。また、チェンバーの下流に金製の光子ビームモニターを設け、ビーム変動の監視とリング電子電流の減衰のチェックに用いている。軟X線分光器と上流側のフィルターチェンバーは、イオンポンプで排気をして超高真空を得ており、第2段目のフィルターチェンバーより下流は、ターボ分子ポンプによる排気をしている。

イオンチェンバーの特性を評価するために、イオンチェンバーにNeを53.2Pa充填したときに、イオンチェンバーに印可する電圧と各電極から得られたイオン電流との関係を測定した (Fig.7 参照)^{24,26)}。イオンチェンバーに印可する電圧が約5Vを越えたところで、光イオン化によって生じたイオンの電流量は一定になり、80Vを越えると再び増加することがわかった。電圧が2eVより低いところでは、生成されたイオンと電子との再結合により電荷が失われイオン電流が少なくなり、また電圧が80eVより高いところでは、生成された電子が電界によって加速され、新たに二次的なイオンを生成するためにイオン電流が増加する。したがって、イオン電流の一定する領域で

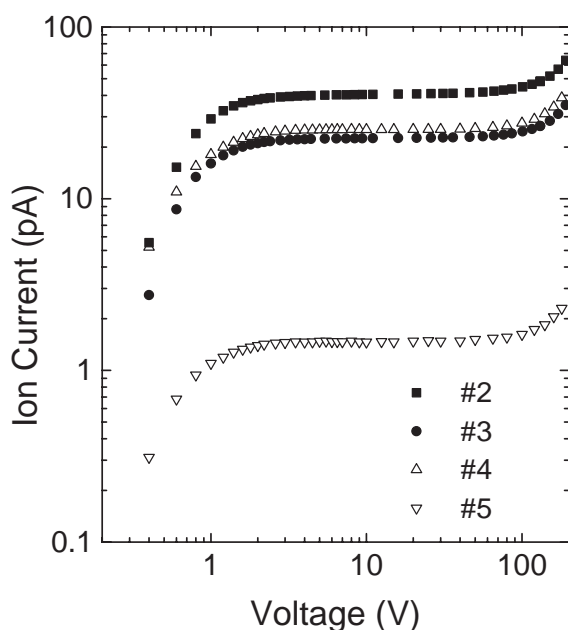


Fig.7 Photoion currents as a function of the applied voltage in the ion chamber. The soft X-ray energy is 72eV, and the used gas is Ne.

ある10Vから50Vの間の印可電圧で測定をする必要がある。

§5 超軟X線絶対強度の計測

イオンチェンバーの特性試験を踏まえて、値を用いて単色軟X線ビームの絶対強度の測定を試みた^{24,26-28)}。軟X線の絶対強度(フルエンス率)は、以下の式で表せる。

$$I = (i_1)^2 / ne(i_1 - i_2) \quad (2)$$

ここで、 i_1, i_2 はイオンチェンバーの一番目と二番目の電極から得られる生成イオン電流である。また n は1個の光子の吸収によって最終的に生成される電子の個数であり、 $n = + (p)$ と表わすことができる。 $h\nu$ は、光子を吸収した原子が放出する電子の個数、 $h\nu_0$ は、放出された電子が他の原子に衝突し最終的に放出させた電子の個数である。 p は、イオンチェンバーに充填した気体の圧力に依存する。真空紫外線領域では、光子エネルギーが低いので、 $h\nu_0$ は1.0であり、 p は0である。しかし、軟X線領域では、 $h\nu_0$ は1.0より大きく軟X線エネルギーに依存する。また p も、0より大きく、軟X線エネルギーおよびガス圧力に依存する。しかしながら、ガス圧が非常に小さくなると、 p は0に近づくので、 I が0の値への外挿をすることによって、軟X線強度を見積もることが可能である。

イオンチェンバーにArを充填して、イオン電流のAr圧力依存性を測定し、見かけの軟X線強度を計算したものをFig.8に示す。Ar圧力が 10^{-3} Torr程度に低くなると強度が一定になっている。これは、二次イオン化の効果である p の値が0に近づいていくからである。すなわちこの圧力で測定された軟X線強度が正しい値となる。このようにして、軟X線分光器の出力強度を測定した結果、100 mAの蓄積電流に対して、1mmのビーム径で1秒当たり、 10^7 から 10^9 個の光子が得られていることが解った。

低圧極限での真の値の読み取りであるが、より正確を期するため、全体の曲線のシミュレーションフィッティングを行った。放出電子によるイオン量の増分は以下の式で表せると仮定する。

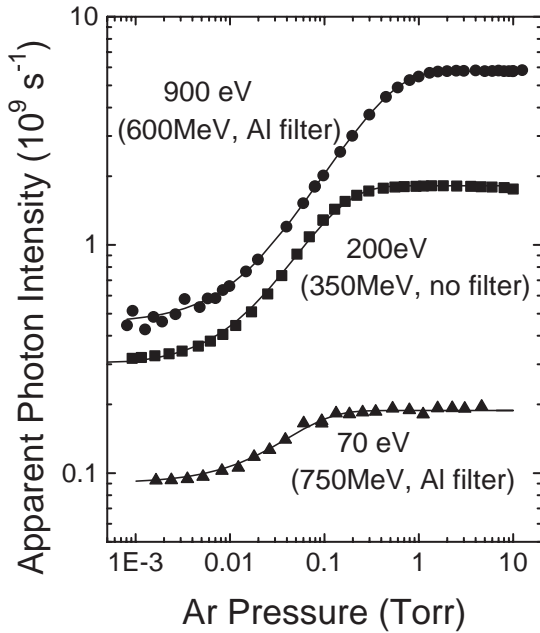


Fig.8 Relation between the Ar gas density and the calculated photon intensity. See the text for the calculation.

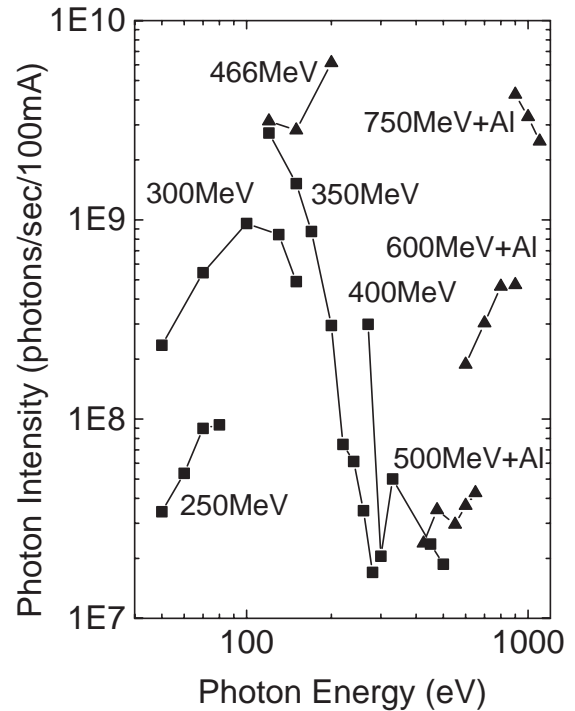


Fig.9 Absolute fluence rates of soft X-rays as a function of the photon energy. Energy values in the figure denote the electron energy in the storage ring. Used filter names are added in the figure.

$$(p) = \rho_0 \{1 - \exp(-p)\} \quad (3)$$

ここで、 p はガス濃度， ρ_0 は高圧極限で生成する電子数， λ は平均自由行程（或いは飛程）に対応するような定数である。フィッティング結果は、Fig.8に実線で示してあり、実験データとよい一致を示している。 ρ_0 から計算できる w 値は、低エネルギー電子による W 値に近い値になり、(3)式での近似が妥当なものであることを示している²⁹⁾。また λ の光子エネルギーへの依存性も合理的な結果となった²⁷⁾。

リング運転条件を種々修正して光子ビームの純度を向上させ、見かけの光子強度のガス圧依存性を求めることにより、50eV - 1.1keVのエネルギー範囲での軟X線フルエンス率を得た (Fig.9)。実験データに付加してある値は、リングの電子エネルギーと付加フィルターの有無である。用いたガスは Ar であり、リング電流 100mA に規格化してある。100eV 以下では、二次光低減化のためにリングの低エネルギー運転を余儀なくされたために、小さな軟X線強度になってしまったが、200eV 近傍と 800eV 以上では、かなりの強度のビームが得られた。絶対強度の信頼性のチェックとして、Ne ガスを用いた絶対測定も100eV 近傍の数点の軟X線エネルギーで行った。結果は良

い一致を示し、ガスの種類による特異性はないことが解った。また軟X線フォトダイオード（同類のものに付き、PTB が校正値を報告している。）の試行的校正を行い、予想値と大きなズレはないことを確認した。個々の測定での誤差評価は、まだ行っていないが、誤差要因としてはイオン電流の揺らぎが一番大きく、次にガス濃度の安定性が効いてくる。電極の長さ等の幾何学的要因や、二次光成分の妨害から来るものは、さほど大きくはない。また Ar の λ は、光子エネルギーによってはあまり正確でない領域もあるので、それぞれのエネルギーで最適である希ガス原子を使う必要もある。Fig.9に示した結果の全不確かさは、4.5 - 10%と推定される。

§6 まとめ

多段型イオンチェンバーとArの λ 値を用い、リングの低エネルギー運転を行って放射光単色超軟X線のフルエンス率の絶対値を求めた。50eV - 1.1keVで1mm径で $10^7 - 10^9/s(100mA)$ が得られた。まだ不確か

さは、あまり小さくはないので、今後は誤差要因の詳細な検討を行ってその減少の方策を講じていく予定である。イオン電流の計測における揺らぎが大きいため、軟X線強度の増大が最も重要な点と考えられる。イオンチェンバーは複数のイオン収集電極を持っているので、軟X線吸収断面積を精度良く測定することが可能である。Ne, Ar について、50eV-1.2keV の領域で測定を行って文献データと比較を行ってみた。今まで報告されたデータには大分バラツキがあるが、最近の Henke らの推奨データとは大部分のエネルギーでよく一致している²³⁾。また、見かけの光子強度のガス圧依存症の高圧極限から見積もった Ar の軟X線領域での W 値は、ArL 殻でジャンプが起こり、我々が以前炭化水素分子のC K 殻で見出した変動と同様の現象が確認された³⁰⁻³²⁾。現状では W 値の精度はあまり高くはないが、これを正確に求めておくと、単一電極イオンチェンバーで絶対測定をすることが可能になるとともに、実用検出器の値付けを行う際に、一点のガス圧でのイオン電流測定で絶対値が見積もれるので、標準の供給という観点から大変重要である。

謝 辞

本稿は電総研電子蓄積リングからの放射光を用いた研究であり、その運転、管理に尽力されている電総研加速器グループの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 崎原克彦：医用標準線量，2, No.1(1997) 27. (1999.11.26受付)
- 2) 鈴木功：FILM BADGE NEWS, 255(1998) 1.
- 3) J.Schwinger：Phys.Rev., 75(1949) 1912.
- 4) I.H.Suzuki and N.Saito：Jpn.J.Appl.Phys. 25(1986) 130.
- 5) I.H.Suzuki and N.Saito：Appl.Opt., 24(1985) 4432.
- 6) R.P.Madden, D.L.Ederer and A.C.Parr：Nucl.Instr.Meth., B10 (1985) 289.
- 7) M.Krumerey and E.Tegeler：Rev.Sci.Instr., 63(1992) 797.
- 8) H.Rabus, V.Persch and G.Ulm：Appl.Opt., 36(1997) 5421.
- 9) M.Richter and G.Ulm：J.Electron Spectrosc.Relat.Phenom., 101 - 103(1999) 1013.
- 10) 加藤隆子：核融合研究, 65(1991) 346.
- 11) H.Saisho and Y.Goshi：Analytical Spectroscopy Library (Elsevier Science, Amsterdam, 1996) Vol.7.
- 12) 鈴木功, 齋藤則生：電総研彙報, 57(1993) 34.
- 13) J.A.R.Samson：Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy (Wiley Interscience, New York, 1967).
- 14) 齋藤輝文：電総研研究報告, 960(1994).
- 15) 鈴木功, 齋藤則生：電総研彙報, 56(1992) 688.
- 16) H.O.Wyckoff：ICRU Report, 31(1979).
- 17) J.B.West and J.Morton：Atom.data Nucl.Data Tables, 22(1978) 103.
- 18) N.Saito and I.H.Suzuki：Int.J.Mass Spectrom.Ion Processes, 115(1992) 157.
- 19) N.Saito and I.H.Suzuki：J.Phys.Soc.Jpn., 66(1997) 1979.
- 20) N.Saito and I.H.Suzuki：Physica Scripta, 49(1999) 80.
- 21) D.M.P.Holl and, K.Codling, J.B.West and G.V.Marr：J.Phys., B12(1979) 2485.
- 22) N.Saito：Res.ETL, 910(1990).
- 23) B.L.Henke, E.M.Gullikson and J.C.Davis：Atom.Data Nucl.Data Tables, 54(1993) 181.
- 24) N.Saito and I.H.Suzuki：J. Synchrotron Rad., 5(1998) 869.
- 25) N.Saito and I.H.Suzuki：Atom.coll.Res.Jpn., 14(1988) 119.
- 26) N.Saito and I.H.Suzuki：KEK Proc.,98-4(1998) 1.
- 27) N.Saito and I.H.Suzuki：J.Electron Spectrosc.Relat.Phenom., 101 - 103(1999) 33.
- 28) 鈴木功, 齋藤則生：放射光, 12(1999) 印刷中
- 29) D.Combecher：Rad.Res., 84(1980) 189.
- 30) N.Saito and I.H.Suzuki：Chem.Phys., 108(1986) 327.
- 31) I.H.Suzuki and N.Saito：Bull.Chem.Soc.Jpn., 60(1987) 2989.
- 32) N.Saito and I.H.Suzuki：Abstracts 21th ICPEAC(Sendai), 1 (1999) 21.