

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 20

[技術情報室]

HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

1992年12月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

は複
う管理
い。

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

柏崎 渉^{*1}, 河村和廣^{*2}

要 旨

表面分析の手法の1つとしてオージェ電子分光法(AES)がある。

試料に軟X線を照射すると表面から数十Å深さでオージェ電子が発生する。この元素固有のオージェ電子をエネルギー選別して、含有元素の定性・定量分析に利用する。

このAES分析資料として下記のハンドブックが出版されている。

- 資料名 (1978, 第2版)

HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

- 著者

Lawrence E. Davis, Noel C. Macdonald

Paul W. Palmberg, Gerald E. Riach

Roland E. Weber

- 出版元

Perkin-Elmer Corporation Physical Electronics Division

この資料の内容には理論的基礎から具体的な分析例まで含有されており、分析担当者がデータを解析する際には非常に役立つ。今回の和訳によって関係部門で多いに利用されることを期待する。

*¹ 株式会社 原燃環境

*² 環境技術開発部 環境技術第1開発室

目 次

緒 論	1
1. 概 説	2
2. 分析技術	3
3. 定性分析	5
4. 定量分析	6
5. 相対元素感度ファクター	10
6. 主オージェ電子エネルギー・チャート	11
7. 元素の標準オージェスペクトル	12
8. ハンドブック使用法	13
付 錄	15

< HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY >

緒論

HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPYの初版は1972年に出版されたが、AES分析は開発がかなり進んでいる。高エネルギービームが普通に用いられ、そのビーム径も小さくなっている。また、AESでの定量分析に関する報告がかなりある。後者の問題や励起や検出パラメータに対する高精度データは第2版に掲載されている。

初版と第2版の大きな差は定量的精度である。各パラメータに対するAugerスペクトルの定量データへに関する論議もされている。

ハンドブックのデータの使用及び例もかなり完成化されており、高エネルギービームによるスペクトルも掲載されている。

元素感度ファクターもグラフ表示されている。数種類の化合物、主に酸化物であるが、化学結合状態の変化に対する典型的なスペクトル変化も示す。

このハンドブック第2版が初版よりも利用・応用されることを期待する。

1 AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

1 概説

表面の化学状態のAES分析はオージェ電子放出プロセスによる。表面原子の中心が電子ビームでイオン化されて、空孔を2個残して電子の再配列が起こり、原子が低エネルギーの安定状態となる。この2つの状態間のエネルギー差が親原子エネルギー特性を持つ放出されるオージェ電子に与えられる。オージェ遷移は表面から数Åの深さの所で起こった場合、オージェ電子はエネルギー・ロスなしで表面から放出され、2次電子のエネルギーのピークを生ずる。これらのオージェスペクトルのエネルギー及び波形が固体表面の組成の厳密な同定に用いられる。

AESシステムは超高真空系、励起電子銃系、エネルギー分析器から構成されている。オージェピークは連続バックグラウンド上に存在するが、エネルギー分布関数N(E)を微分して簡単に検出できる。この電子関数の微分は交流のエネルギー選別電圧を重畠し、電子増幅器の出力信号を検出して速度解析器によって求めることができる。一般的に微分スペクトル中のオージェピーク間のピーク幅を直接オージェ電子を発生する表面元素濃度が対応する。高純度の標準元素あるいは既知組成の化合物試料から得られたピーク高を比較して定量解析を行うことができる。

オージェ分析による感度はオージェ遷移の確率、照射ビーム電流及びエネルギー、検出効率で決まる。3kV, 50 μA、高感度円筒状ミラー分析器を使用した場合は検出限界は1eV/secスキャンスピードで0.02-0.2原子%である。He以上の全元素が0-2000eVの領域にオージェピークを持つ。

2 分析技術

オージェスペクトルの取得装置図をFig. 1に示す。数個の試料を回転ホルダーに乗せる。試料表面に垂直に照射して分析するが、非導伝性試料の場合にはチャージを防ぐため俯角入射とする。両試料共に入射角は60°で、パラメータのセッティングにAgを使う。

清浄な試料とするためにArスパッタ、研磨、薄膜蒸着を行う。装置を加熱せずにスパッタリングにより大部分の試料の清浄な表面からのスペクトルを取得できる。スパッタ・レートは還元ガスの吸着レートよりもかなり速い。

反応性の高い金属では表面酸化層はスパッタを行うにはあまりにも厚い。清浄な表面を得る適当な方法はカーバイドでの研磨である。研磨面は照射ビーム径以上必要である。更に高速円筒状分析器を使用した場合、測定中にかなりの吸収が生ずる。反応性の高い金属の蒸気圧は高いのでベークアウトによる高真空達成は不可能である。Mgスペクトルを清浄な蒸着膜から得ることができ、Siウェハー中のCsとArのイオン注入からCs, Arスペクトルを得ることができる。XeスペクトルをO試料のXeイオン注入から得ることができる。

エネルギー値は既知の反射電子の検出電圧で補正される。分析器のターゲット表面からの反射後、電子の運動エネルギーは次式で表される。

$$E_k = eV_p + \phi_r - \phi_a \quad (1)$$

ここで V_p は加速電圧で、 ϕ_r は電子の仕事関数で、 ϕ_a は分析器の仕事関数である。反射電子の検出電圧は次式で表される。

$$eV_o = \alpha E_k = \alpha (eV_p + \phi_r - \phi_a) \quad (2)$$

ここで α は分析器の幾何学的形状で決まる定数である。測定値 α は V_o/V_p で求められ、理論値 α は(2)式で与えられる。従って仕事関数による誤差は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\phi_a - \phi_r}{eV_p} \quad (3)$$

ステンレス製分析器とWフィラメントの仕事関数差は1eV以下と考えられる。加速電圧2kVでは仕事関数による誤差は0.05%以下である。加速電圧の精度は2kVで1V程度である。0-2kVのエネルギー領域ではこのハンドブックに示したデータの精度は1eVである。

オージェ信号は照射エネルギー及び電流、分析器の分解能、調整電圧値、增幅ゲイン、アンプ感度に依存する。種々の元素スペクトルの比較からこれらの変化をチェックする必要がある。

分析器の検出能力と分解能はこのハンドブックにおいては各々10%、0.6%である。

3-5keVのビームエネルギーでオージェ分析が行われる。最適励起エネルギーを各スペクトル毎に示している。照射電流は2-50μAで調整されるが、試料のダメージを低くするようしなければならない。

増幅ゲインを標準試料に対してAgの351eVのピークを調整して一定に保つ。

調整電圧値はオージェピーク幅から決める。ピーク幅を左右するシステム上の問題は分析器のエネルギーと共に線形的に増加する。分解能0.6%では1000eVで6eV程度存在し、2000eVでは12eVである。電圧の乱れは低エネルギー側で2eVで、高エネルギー側で6eVである。オーバーラップによりピーク波形が歪んでいないことに注意する。このような条件の下でオージェ信号は調整電圧に比例する。

Agの標準信号による増幅電圧調整後、アンプゲイン、調整電圧値及び照射ビームエネルギー・電流などを調整する。このハンドブックのスケールは加速電圧3keVでAgスペクトルで補正したものと比較した場合のシステム感度アップを表す。

増幅器のゲインの規格化において特にファースト・ステージのゲイン変化を考慮する必要はない。ファースト・ステージは通常、アースされており、オージェ電子はまずここに達する。増幅器ゲインはFig. 2に示すようにエネルギーと共に変化する。2次電子の強度的に強く低エネルギー信号を強調できるように低エネルギー側でのゲインの低さが望まれる。200 eV以上のエネルギーを持つ電子に対してはゲインはほとんど一定である。ファースト・ステージのゲインのエネルギー依存性は時間変化するので、それによって生ずる誤差がスケールに生ずる。しかし200 eV以上ではこの誤差は小さくなるが、これはこのレンジでのファースト・ステージゲインがほとんどエネルギーに対して独立であるからである。

3 定性分析

オージェスペクトルのピーク同定を主なオージェ電子エネルギーと標準試料のチャートを用いて行うことができる。チャート（裏表紙の内側）はオージェ電子エネルギーと原子番号間の関係を示す。主なオージェピークをチャートに簡単に図表化している。KLL, LMM, MNN オージェ遷移が0-2000eVレンジをスキャンしてHe以上の元素に対して観測される。異種元素のオージェピークが時々、オーバーラップする場合があるが、メインピークによる削除により実際にはこのような問題は解決される。

オージェスペクトルのピーク同定手法を下記する。

- 1 先ず、メインピークに着目する。数元素の可能性をエネルギー・チャートを用いて排除する。メインピークの同定を標準スペクトルと比較して行う。この比較を行う場合、化学結合状態により数eVのピークシフトが起こる可能性に注意する。従って問題となる元素のピークが標準試料と異なる化学結合状態である場合、数eVのピークシフトが予想される。
- 2 主成分の同定後、標準スペクトルを用いて関連ピークをチェックする。
- 3 未同定ピークは微量元素に相当する。濃度が低いためこれらの元素の最強線のみが観測される。

一般的にはこの手順で速く正確なスペクトル同定を行うことができる。未同定ピークがまだ存在している場合、イオン化によってエネルギー・ロスした電子によるピークの可能性がある。これをチェックするには照射ビームエネルギーを変えてピークシフトを観測すれば良い。このピークがシフトした場合、オージェピークではない。エネルギー・ロスペークを減ずるために照射ビームのエネルギーを分析対象元素のオージェエネルギー以上にセットする。

4 定量分析

オージェ信号と原子濃度間の関係を調べるために測定時の分析パラメータをチェックしなければならない。特に重要なパラメータは照射電流(I_p)、エネルギー(E_p)、 $dN(E)/dE$ スペクトル及び調整エネルギー(E_m)である。オージェピーク間には線形的な関係があることが予想され、Fig. 3 に示すように Au(69eV)に対して I_p については実験的に確かめられている。オージェ電子エネルギーと照射ビーム電流間の線形的関係は、照射ビーム径が分析範囲をオーバーしたり大電流により試料にダメージがある場合にはこの関係は失くなる。

Au(69eV)とAu(2024eV)の各ピークと調整エネルギー E_m 間の関係をFig. 4 に示す。調整エネルギーがオージェピーク幅よりも小さい場合、オージェピーク強度は調整エネルギーに比例する。調整エネルギー値が大きい場合、ピークはプロードになり、ピーク強度は E_m に対して非線形となる。Au(69eV)ピーク強度は 2 eV以上では調整エネルギーに対して非線形となり、ピーク幅が大きくなるために2024eVのピーク強度は0- 6 eVの範囲で線形的である。

照射ビームエネルギー E_p に対するオージェ電子スペクトル変化はオージェ遷移中心のイオン化断面積のエネルギー依存性に左右される。 E_p がイオン化しきい値 E_c に達したり、 E_p/E_c の最大値の 5 倍になると、オージェ電子は急激に 0 から増加する。 I_p 及び E_m を一定に保持した場合、Fig. 5 に示すように Au(69eV) 遷移は約 $E_p=1.5$ keV で最大となる。逆に高エネルギー側の Au(2024eV) ピークは照射エネルギーが 10 keV 以上で最大に達する。

分析条件を考慮して標準スペクトルを用いて有効な定量解析を行うことができる。この方法による精度は同じ様な考え方に基づく EPMA 分析などと同程度である。

定量分析の大体の結果を試料のオージェ強度と標準試料スペクトルと比較して求めることができる。この場合、試料中の元素Xの原子濃度は次式で求められる。

$$C_x = \frac{I_x}{I_{x, \text{STD}}} \quad (4)$$

ここで I_x 及 $I_{x, \text{STD}}$ は試料のピーク強度と標準試料のピーク強度に相当する。精度を上げるには分析試料と共に標準試料をセットして分析すれば良い。その場合は同一分析条件の下での比較となる。未知試料から複数のオージェピークが観測された場合には同エネルギーピークで比較する。但し、この測定においては試料表面のコンタミが除去されている必要がある。

別の方法として多数の標準試料を使用せずに、未知試料とAgのオージェピーク強度を比較する方法がある。ある元素XとAgの相対感度 S_x はこのハンドブックより次式で求められる。

$$S_x(E_p) = \left(\frac{A + B}{A} \right) \frac{I_x^H}{K_x I_{Ag}^H} \quad (5)$$

ここで I_x^H 及び I_{Ag}^H は元素Xと標準試料のピーク強度である。 K_x はハンドブックに掲載されているファクター($K_{Ag}=1$) である。A とB は化合物 $X_A Y_B$ の化学量論値で、元素X の大まかな定量分析に用いられる。更に精度をアップするには標準元素Xの濃度と化合物の元素Xの比を利用すれば良い。

濃度を求めるには E_p をハンドブック掲載値にセットし、妨害線を避けるために E_m をかなり小さくする。検出增幅電圧あるいは E_p (I_p , E_m 及びアンプ感度を調整) を変えずに入射ビーム電流 I_p , x を収集する。この場合、元素Xの原子濃度は次式で与えられる。

$$C_x = \frac{I_x}{I_{Ag} S_x D_x} \quad (6)$$

ここで I_x は元素X のピーク強度で、 I_{Ag} はAg標準試料のピーク強度、 D_x は未知試料とAg標準試料間の相対的ファクターである。アンプ感度 L_x 、エネルギー E_m 、 x 照射ビーム電流 I_p , x のパラメータが未知試料とAg標準試料の分析において異なる場合は、相対的ファクターは次式で表される。

$$D_x = \frac{L_x E_m, x I_p, x}{L_{Ag} E_m, Ag I_p, Ag} \quad (7)$$

元素標準試料あるいはAg標準試料を用いない場合は原子濃度を次式での概算が可能である。

$$C_x = \frac{I_x}{S_x d_x} / \sum_a \frac{I_a}{S_a d_a} \quad (8)$$

ここで I_x と S_x は前記した通りで、 Σ は元素中の 1 ピークの和を示し、 d_x は次式で表されるファクターである。

$$d_x = L_x E_{m,x} I_{p,x} \quad (9)$$

この方法での利用は I. 5 節のグラフに示されている $E_p = 3, 5, 10 \text{ keV}$ での相対元素感度ファクター $S_x (E_p)$ を用いると容易になる。各 E_p 値について元素標準あるいは Ag 標準スペクトルから得られた S_x が、(5) 式で計算された Ag ピーク (351 eV) と比較表示されている。そのデータは $E_p = 3 \text{ keV}$, $S_{Ag} = 1$ として規格化されている。

相対感度がどの程度かということを調べるために(8)式を利用し、304ステンレスの延性に富む表面におけるピーク強度を用いる。UHV でのその場での試料表面はバルク組成と同じであると考えることができる。低エネルギー側のオージェピークは一般的に磁気効果やチャージによる妨害の可能性があるので、定量分析には約 100 eV 以上に観測されるピークを用いるのが適当である。従って、Fe(703 eV) ピークは Fe(47 eV) よりも適当であり、Fig. 6 に示すように Fe(703 eV), Cr(529 eV), Ni(848 eV) の相対ピーク強度は $10.1, 4.7, 1.5$ である。これらの相対感度ファクターは (5) 式で計算され、 $0.20, 0.29, 0.27$ である。ファクター d_x は各ピークで同じなのでキャンセルされる。Fe(703 eV) ピークに対して(8)式を適用すると下記のようになる。

$$C_{Fe} = \frac{10.1/0.20}{10.1/0.20 + 4.7/0.29 + 1.5/0.27} = 0.70$$

同じように Cr(529 eV), Ni(848 eV) に対して計算すると $0.22, 0.08$ となる。この金属試料の既知のバルク組成比は $C_{Fe} = 0.702, C_{Cr} = 0.205, C_{Ni} = 0.093$ であり、オージェ定量分析データと良く一致する。

これらの定量方法には特有の誤差が存在する。(1) 電子の脱出深さや後方散乱ファクターによるマトリックス効果、(2) 化学結合の影響、(3) 表面荒さである。例えば試料からのオージェ電子脱出深さは標準試料と未知試料で異なる。オージェピーク強度は分析領域中の原子濃度に比例するので、脱出深さが大きくなるとピーク強度が増加することになる。化学結合

状態の影響はピーク波形に表れる。この変化した波形においてピーク強度を利用すればその変化に相当する誤差を持つことになる。また一般的に研磨面は非研磨面よりもオージェ強度が強い。表面荒さにより全オージェスペクトル強度が同じ割合で弱くなるので、(8)式を用いてこの効果についてはその影響を小さくできる。

高精度定量分析を行う場合、未知試料の組成に近い既知標準試料を用いる。この場合には電子脱出深さ、後方散乱係数や化学結合状態を考慮する必要はない。

5 相対元素感度ファクター

相対元素感度ファクター S_x は次のページに図表化されており、照射ビームエネルギー、5, 10keVでの高純度元素試料及び化合物試料から得られたものである。I. 4節で述べたように元素Xの原子濃度は S_x 値を用いて(6), (8)式から計算される。 S_x はスペクトル固有の遷移と考えられ、実際には大体、一致する。

KLL 遷移の感度曲線の概算に用いるピークは▲でマークしており、LMM遷移は●、MNN遷移は■。この S_x に相当するピークを元素検出や原子濃度決定に利用する。ハンドブック中の他のピークの感度ファクターについては(5)式から計算している。

高エネルギー(>100eV)側での遷移は磁気効果やチャージによる妨害がないので、それらのピークは強度的に強くなる。 S_x の平均値を用いる場合がある。例えば $E_p = 3\text{keV}$ でFe(703eV)ピークの測定を3回行ったする。 S_{Fe} としてその平均値を用い、測定値の±5%以内である。絶縁体試料の場合には約±20%の誤差となる。

また5, 10keVの場合に対しても3keVデータ及び励起エネルギーに対する感度依存性データから求められている。例としてLu(1573eV)の感度ファクターは3, 5keVでのSi(1619eV)のピーク強度比を用いて3keVでのLuデータから求められる。

以下に示す曲線は平均値及び補間値に"best fit"すると考えられており、直接ハンドブックスペクトルから計算して感度ファクターによる同定を行う必要はないであろう。 S_x 値の精度はグラフ中の実線で囲まれた影の部分で示している。ここでの相対元素感度ファクターは内部標準試料による補正は行われてはいない。未知試料に近い組成の標準試料を用いて高精度分析が可能である。

6 主オージェ電子エネルギー・チャート

PHI の主オージェ電子エネルギー・チャートはオージェ遷移エネルギーと原子濃度間の関係を示す。チャート中の点はオージェスペクトル中に観測されるメインの負のピークに相当する実験データである。大きな点は最強ピークである。これらのピークにより元素同定を早く行うことができる。他のオージェピークについても掲載している。例えばKLL遷移はK殻の第一イオン化とL殻からのK殻の空孔への電子遷移過程で起きる。この過程で生ずるエネルギーが他のL殻電子に作用し、結果として特性エネルギーを持つオージェ電子が放出・同定される。

7 元素の標準オージェスペクトル

このハンドブックに掲載してあるスペクトルは高純度元素試料あるいは既知組成化合物試料から得られたものである。システムの感度は3keV励起でAg試料から得られており、グラフのスケールファクターとして示している。3keV励起と同様に5keVの場合のスペクトルも3keVでの情報がない場合を考慮して励起エネルギー E_{α} も示している。

元素標準試料のスペクトルには各ピークのエネルギーがグラフ中に記述されている。以下の簡単な方法で、その数値はオージェスペクトル中の負のピークのエネルギーを示していることがわかる。不純物からのピークにはその化学式をピークに表示している。化合物の場合、考慮中の元素からの遷移ピークにはその化学式とエネルギーを表示し、他の成分や不純物の場合には化学式のみを表示している。化合物名をスペクトルに示した。

I. 5節で述べた S_{α} 値を求めるために用いる各ピークは▲、●あるいは■でマークしており、KLL, LMM, MNN遷移のどれに相当するかを示している。

低エネルギー領域への拡張や高エネルギー遷移を示すために多くのスペクトル・チャートでそのエネルギー・スケールを考慮している。中間エネルギー領域が表示されていない場合はその領域に顕著なピークが存在していない。

8 ハンドブック使用法

以下の分析ステップに従う場合にこのハンドブックは大いに役立つ。

定性分析

エネルギー表と標準試料のスペクトルの組み合わせで簡単に同定を行うことができる。

1. メインピークから数元素の同定を行う。
2. 標準スペクトルとの比較から主成分の正のピークの同定を行う。
3. 主成分のピークを全てマークする。
4. 未同定ピークについてはstep1, 2で同定できない場合は微量成分の可能性がある。低濃度の場合、その元素の最強ピークが観測される。

定量分析

標準スペクトルと高純度Ag試料をから定量データを得ることができる。

1. 化合物 $X_A Y_B$ の元素XとAgのオージェスペクトル間の相対感度 S_x を次式より計算する。

$$S_x(B_p) = \left(\frac{A + B}{A} \right) \frac{I_x^H}{K_x I_{Ag}^H} \quad (5)$$

ここで I_x^H 及び I_{Ag}^H は元素XとAgの1ピークである。 K_x は元素Xのスペクトルのスケールファクターである。

2. 元素Xの原子濃度を次式を用いて計算する。

$$C_x = \frac{I_x}{I_{Ag} S_x D_x} \quad (6)$$

ここで I_x 及び I_{Ag} は試料中の元素Xと標準Ag試料のピーク強度で、 D_x はI. 4節で述べた(7)式で定義されるスケールファクターである。同じオージェピーク対を用いて S_x を計算したように C_x を求めるようとする。

3. おおよその元素感度ファクター S_x はこのハンドブックのI. 5節にまとめられている。これらの感度ファクターは(8)式からもわかるように標準試料の代わりに用いられる。しかし、ここでもこの方法による定量的限界が存在することに注意する(定量分析に関するI. 4節参照)。I. 5節の元素感度ファクター曲線を求めるためのピークにマークしている。

付 錄

HANDBOOK OF
AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

A Reference Book of Standard
Data for Identification and
Interpretation of Auger Electron
Spectroscopy Data

SECOND EDITION

By

Lawrence E. Davis

Noel C. MacDonald

Paul W. Palmberg

Gerald E. Riach

Roland E. Weber

Published by

Physical Electronics Division
Perkin-Elmer Corporation
6509 Flying Cloud Drive
Eden Prairie, Minnesota 55343

Second Printing 1978
© Copyright 1972, 1976
By
Physical Electronics Industries, Inc.

All rights reserved.
Printed in U.S.A.

Preface to the Second Edition

Since the first edition of the HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY was published in 1972, the Auger Electron Spectroscopy (AES) technique has undergone considerable development. Higher excitation beam energies have become common and smaller beam sizes coupled with beam scanning now enable elemental images to be routinely obtained. In addition, considerable work on the quantitative aspects of AES has been documented. The interest in the latter and the need for more complete relative sensitivity data as a function of the various excitation and detection parameters have spurred the publication of the Second Edition.

The primary difference between the first and second editions lies in the completeness of the quantitative information contained herein. A systematic discussion of the dependence of the quantitative

data in the Auger spectrum upon a number of variable parameters is now included.

Descriptions and examples of how to use the data in the Handbook have been made more complete and spectra produced using higher energy electron beam excitation have been added. A graphical presentation of relative elemental sensitivity factors is now included. Spectra of several compounds, primarily oxides, have been added to illustrate typical changes in the spectra with variation in chemical matrix.

We hope that this Second Edition of the Handbook of Auger Electron Spectroscopy will receive the acceptance, application and constructive criticism received by the First Edition.

Physical Electronics Industries, Inc.
February, 1976

Contents

I.	Auger Electron Spectroscopy	
1.	Introduction	1
2.	Experimental Techniques Used to Obtain Standard Auger Spectra ..	2
3.	Qualitative Analysis	4
4.	Quantitative Analysis	5
5.	Relative Elemental Sensitivity Factors	11
6.	Chart of Principal Auger Electron Energies - Description	16
7.	Standard Auger Spectra of the Elements - Description	16
8.	How to Use the Handbook	17
II.	Standard Auger Spectra of the Elements (In Order of Atomic Number)	19
III.	Addendum	
1.	Periodic Table of the Elements	251
2.	Alphabetical Index of the Spectra ..	252
3.	Chart of Principal Auger Electron Energies	Inside Back Cover

I. AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

1. Introduction

The Auger electron spectroscopy technique for chemical analysis of surfaces is based on the Auger radiationless process. When a core level of a surface atom is ionized by an impinging electron beam, the atom may decay to a lower energy state through an electronic rearrangement which leaves the atom in a doubly ionized state. The energy difference between these two states is given to the ejected Auger electron which will have a kinetic energy characteristic of the parent atom. When the Auger transitions occur within a few angstroms of the surface, the Auger electrons may be ejected from the surface without loss of energy and give rise to peaks in the secondary electron energy distribution function. The energy and shape of these Auger features can be used to unambiguously identify the composition of the solid surface.

An Auger electron spectroscopy system consists of an ultrahigh vacuum system, an electron gun for specimen excitation, and an energy analyzer for detection of Auger electron peaks in the total secondary electron energy distribution. Because the Auger peaks are superimposed on a rather large continuous background, they are more easily detected by differentiating the energy distribution

function $N(E)$. Thus the conventional Auger spectrum is the function $\frac{dN(E)}{dE}$. Electronic differentiation is readily accomplished with a velocity analyzer by superimposing a small a.c. voltage on the energy selecting voltage and synchronously detecting the output of the electron multiplier. The peak-to-peak magnitude of an Auger peak in a differentiated spectrum generally is directly related to the surface concentration of the element which produces the Auger electrons. Quantitative analysis may be accomplished with varying degrees of accuracy by comparing the peak heights obtained from an unknown specimen with those from pure elemental standards or from compounds of known composition.

The sensitivity of the Auger technique is determined by the transition probability of the Auger transitions involved, the incident beam current and energy, and by the collection efficiency of the analyzer. With a 3 kV, 50 μ A beam and a high sensitivity cylindrical mirror analyzer, the limit of detection for the elements varies between approximately 0.02 and 0.2 atomic percent with spectrum scanning rates of 1 eV per second. All elements above helium produce Auger peaks in the 0-2000 eV range.

2. Experimental Techniques Used to Obtain Standard Auger Spectra

The experimental arrangement for obtaining the Auger spectra is shown in Figure 1. Several specimens were mounted on the carousel holder at each loading and sequentially rotated into the analysis position. The analysis was carried out with the excitation beam normal to the specimen surface except for some nonconducting specimens where grazing incidence was required to reduce charging effects. In these cases the angle of incidence was 60° for both the specimen and the silver standard used to set the operating parameters.

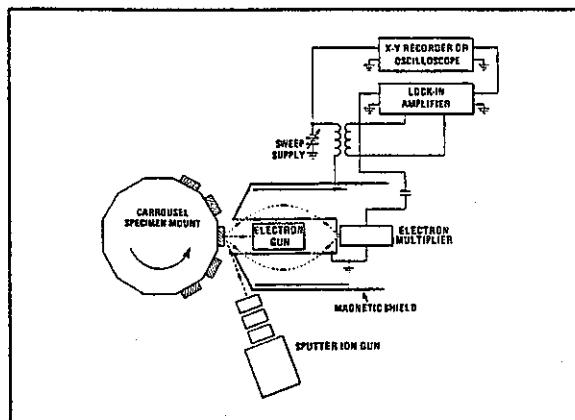


Figure 1: Schematic of the experimental arrangement used for obtaining standard Auger spectra.

The procedures used to obtain clean specimens were argon ion sputter-etching, scribing, and thin film deposition. Most spectra were taken during argon ion sputtering which produced relatively

clean surfaces without baking the system. The sputter-etching rates were considerably faster than the adsorption rate of active residual gases.

For many of the highly reactive metals the surface oxide layer was too thick for convenient removal by sputter-etching. A more expedient method for producing a clean surface was to scribe the surface in situ with a carbide tip. The top of the scratched groove was wide enough to allow the incident electron beam to excite only the freshly exposed material. Even with the high speed cylindrical analyzer, considerable adsorption sometimes occurred before completion of the measurement. The high vapor pressure of many of the reactive metals prevented attainment of ultrahigh vacuum through bakeout. The spectrum from magnesium was obtained from a freshly evaporated film, and the cesium and argon spectra were obtained by implanting Cs and Ar ions in a silicon wafer. The xenon spectrum was obtained by implanting Xe ions in a carbon specimen.

The energy scale was calibrated by measuring the analyzer voltage required to transmit elastically reflected primary electrons of known energy. After reflection from the target surface into the analyzer, the kinetic energy of the primary electron is:

$$E_k = eV_p + \phi_f - \phi_a \quad (1)$$

where V_p is the electron gun voltage, ϕ_f is the electron gun filament work function and ϕ_a is the work

function of the analyzer material. The analyzer voltage required to transmit the elastically reflected electrons is:

$$eV_o = \alpha E_k = \alpha(eV_p + \phi_f - \phi_a) \quad (2)$$

where α is a constant determined by the geometry of the analyzer. The measured α is V_o/V_p while the actual α is given by (2). Thus the percentage error due to work functions in this procedure is:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\phi_a - \phi_f}{eV_p} \quad (3)$$

The difference between the work functions of the stainless steel analyzer and the tungsten filament is expected to be less than 1 eV. For a gun voltage of 2,000 volts the percentage error caused by work functions is therefore less than 0.05%. The accuracy of the measured gun voltage was better than one volt at 2,000 volts. Thus, for the energy range from zero to 2,000 eV, the instrumentation accuracy of the data presented here is about 1 eV.

The amplitude of the Auger signal is dependent on the exciting beam energy and current, the transmission and resolution of the analyzer, the amplitude of the modulation voltage, the multiplier gain, and the sensitivity setting of the lock-in amplifier. For meaningful comparison of the spectra from various elements, it is necessary to record these variables.

The analyzer transmission and resolution were 10% and about 0.6% respectively for all data in this handbook.

Beam energies of 3 and 5 keV were used to obtain the Auger spectra in this handbook. The appropriate value of excitation energy is indicated on each

spectrum. Beam current ranged from 2 μ A to 50 μ A and was adjusted to provide convenient measurement conditions but was kept low enough to avoid specimen damage.

The multiplier gain was kept at a constant value by adjusting the multiplier voltage to maintain a constant peak-to-peak deflection for the 351 eV Ag peak when using standard values for all other parameters.

The amplitude of the modulation voltage used depended on the energy width of the Auger peaks. The instrumental contribution to the peak width increases linearly with energy in velocity analyzers. Thus for a resolution of 0.6% the instrumental contribution is 6 eV at 1,000 eV and 12 eV at 2,000 eV. The amplitude of the perturbing voltage ranged from 2 eV at low energies up to 6 eV at high energies. In all cases care was taken to insure that the peak shapes were not distorted by overmodulation. Within this limit the amplitude of the Auger signal is proportional to the modulation amplitude.

After adjusting the multiplier voltage to achieve a standard signal from Ag, only the lock-in amplifier gain, modulation amplitude and incident beam energy and current were adjusted to obtain spectra from other samples. The scale factors which label each of the spectra in this handbook represent the increase in instrumental sensitivity relative to that used to obtain the Ag spectrum with 3 keV excitation.

The procedure used to normalize the multiplier gain does not properly account for the variation in first stage gain with energy. The first stage is normally at ground potential which means that the Auger electrons strike the first stage with their

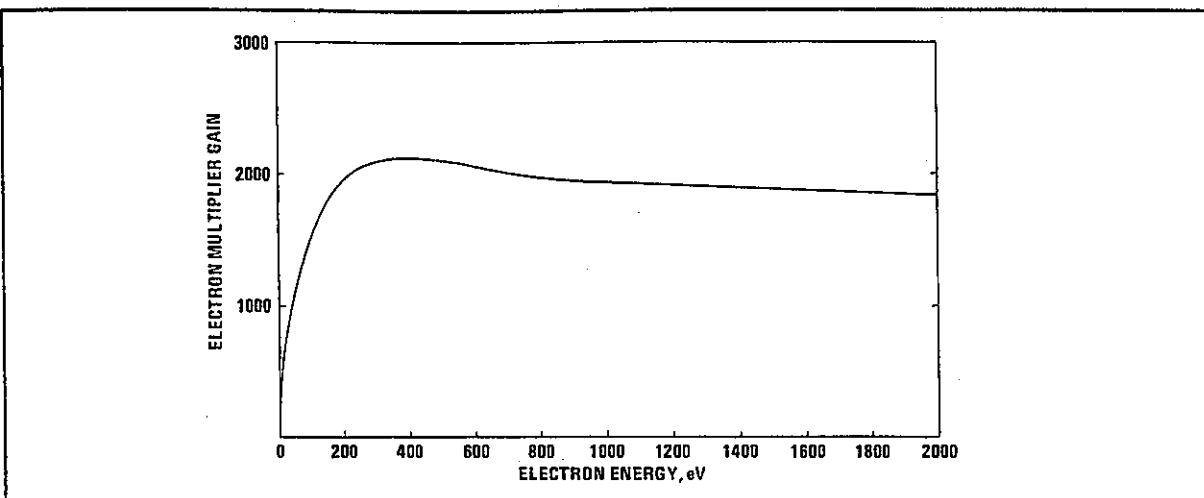


Figure 2: Typical electron multiplier gain variation with electron energy.

initial energy. The multiplier gain varies with energy according to Figure 2. The low gain at low energies is desirable in that it suppresses the large, low energy signal from the true secondary electrons. For electrons with more than 200 eV energy the gain is

nearly constant. If the energy dependence of the first stage gain varies in time, a corresponding error occurs in the scale factor. Above 200 eV, however, this error must be small, because the first stage gain in this range is nearly independent of energy.

3. Qualitative Analysis

The identification of peaks in the Auger spectrum is accomplished most efficiently through the combined use of a chart of Principal Auger Electron Energies and the standard spectra. The chart (Inside Back Cover) gives the relationship between Auger electron energies and atomic number. For

simplicity only the principal Auger peaks are listed on the chart. The KLL, LMM and MNN Auger transitions produce observable peaks which allow identification of all elements above helium by scanning the 0-2,000 eV range. Although Auger peaks from different elements can sometimes overlap,

complete obliteration of peaks from a trace impurity by more dominant species seldom occurs in practice.

A useful procedure for labeling peaks in an Auger spectrum is the following:

1. First concentrate only on the major peaks. Use the chart of Principal Auger Electron Energies to reduce the number of possibilities to two or three elements. The correct identification of major Auger peaks is then easily accomplished by referring to the standard Auger spectra. When making this comparison it must be noted that peak shifts of a few eV often occur due to chemical bonding. Therefore, deviations of a few eV in peak energy from those listed on the standard spectra should be considered insignificant if the element in question is in a chemical environment different from that used for the standard spectrum.

2. When positive identification of major constituents has been made, use the standard spectra to label all peaks attributable to them.
3. Peaks which are not yet labeled originate from minor constituents whose identification proceeds as above. Because of low concentration, only the most prominent peaks of these elements will be observed in the spectrum.

In general, this procedure results in rapid and unambiguous interpretation of the spectra. If peaks remain which have not yet been identified, they may be energy loss peaks due to primary electrons which have lost a discrete amount of energy through ionization of core levels. To test this possibility, change the primary beam energy and observe whether the peak shifts in energy by the same amount. If the peak moves, it is not an Auger peak. To minimize the occurrence of energy loss peaks, the primary beam energy should be set well above the Auger energies of interest.

4. Quantitative Analysis

In determining the relationship between the Auger electron signal and atomic concentration it is necessary to evaluate the effect of instrumental parameters on the measured Auger signal. The important instrumental variables are the primary electron beam current (I_p), the primary beam energy (E_p) and, for the conventional $dN(E)/dE$ spectrum, the modulation energy (E_m).

The anticipated linear relationship between the Auger peak-to-peak amplitude and I_p is experimentally verified in Figure 3 for the Au (69 eV) peak. This linear relationship between Auger amplitude and incident beam current is no longer valid when the incident electron beam diameter exceeds the analyzer source diameter or when excessively high current density causes damage to the specimen.

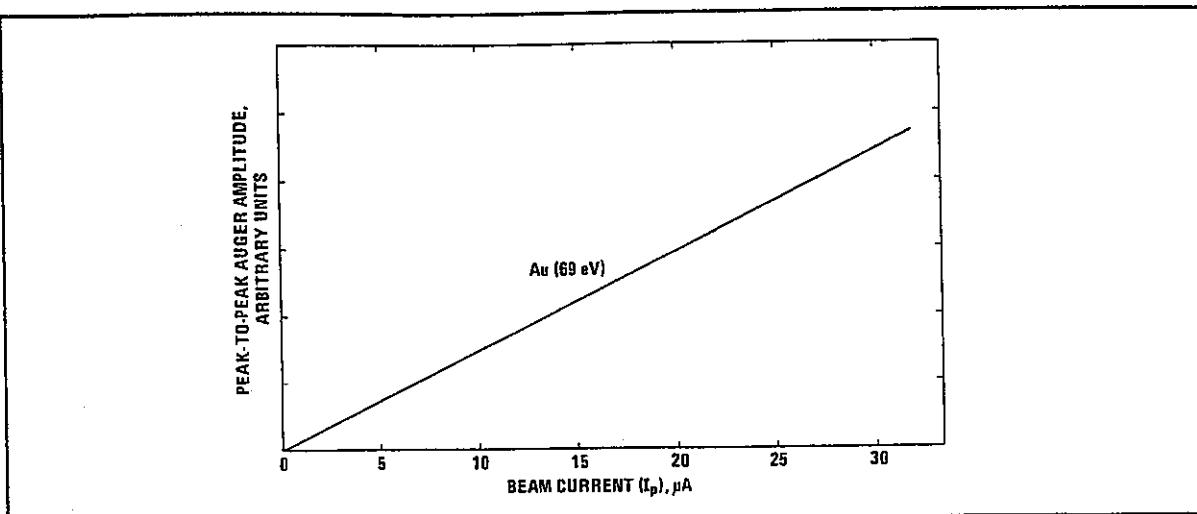


Figure 3: Verification of the linear relationship between the peak-to-peak amplitude of the Auger signal and excitation beam current for the Au(69 eV) Auger peak; $E_p = 5 \text{ keV}$, $E_m = 2 \text{ eV}$.

The relationship between the Auger peak-to-peak amplitudes of the Au (69 eV) and Au (2024 eV) peaks and modulation (peak-to-peak) energy, E_m , is shown in Figure 4. The Auger amplitude is proportional to the modulation energy when the modulation energy is small compared with the Auger peak width. For larger modulation amplitudes, the peak is instrumentally broadened and the peak-to-peak amplitude becomes nonlinear with E_m . As shown, the Au (69 eV) peak-to-peak amplitude is significantly nonlinear with modulation energy greater than 2 eV peak-to-peak, while, due to its larger peak width, the amplitude of the 2024 eV peak is linear throughout the zero to 6 eV range.

The variation of the Auger electron yield with primary beam energy, E_p , is largely determined by the energy dependence of the electron impact ionization cross-section of the core level involved in the

Auger transition. The Auger yield rises abruptly from zero as E_p crosses the ionization threshold, E_c , and increases to a maximum for E_p/E_c of at least five. When I_p and E_m are maintained constant, Figure 5 shows that the Au (69 eV) transition reaches maximum yield at $E_p \approx 1.5 \text{ keV}$. In contrast, the higher energy Au (2024 eV) peak reaches maximum yield at a primary beam energy greater than 10 keV.

With the instrumental parameters in mind a highly useful form of quantitative analysis can be achieved with the use of elemental standards. The accuracy of the methods to be described is similar to that realized in electron microprobe analysis using methods of similar sophistication.

A first order approximation to quantitative analysis can be accomplished through comparison of the Auger signal from the sample to the Auger signal

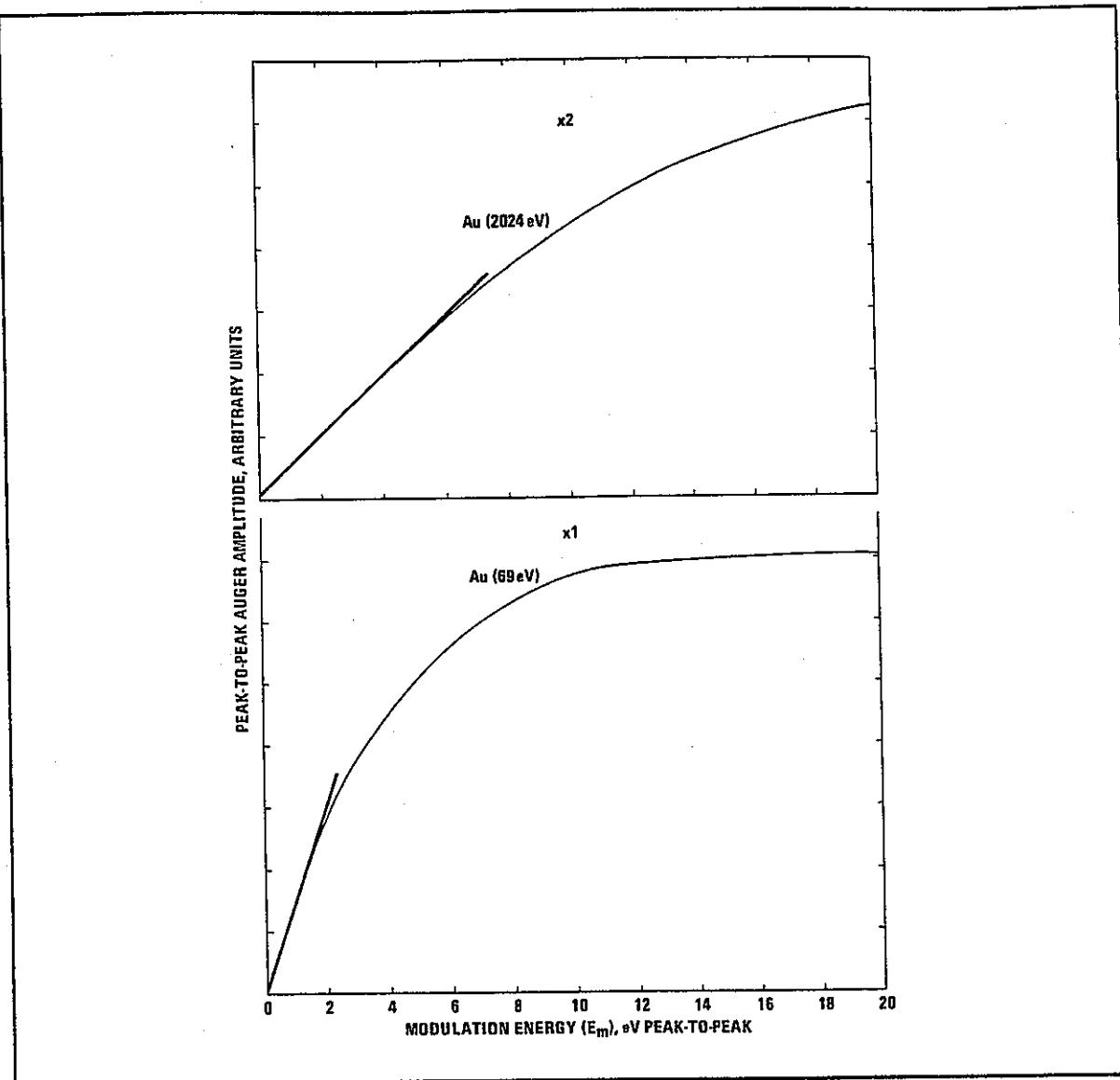


Figure 4: Relationship between Auger peak-to-peak amplitude and modulation energy for the Au(69 eV) and Au(2024 eV) peaks; $E_p = 8 \text{ keV}$, $I_p = 3 \mu\text{A}$.

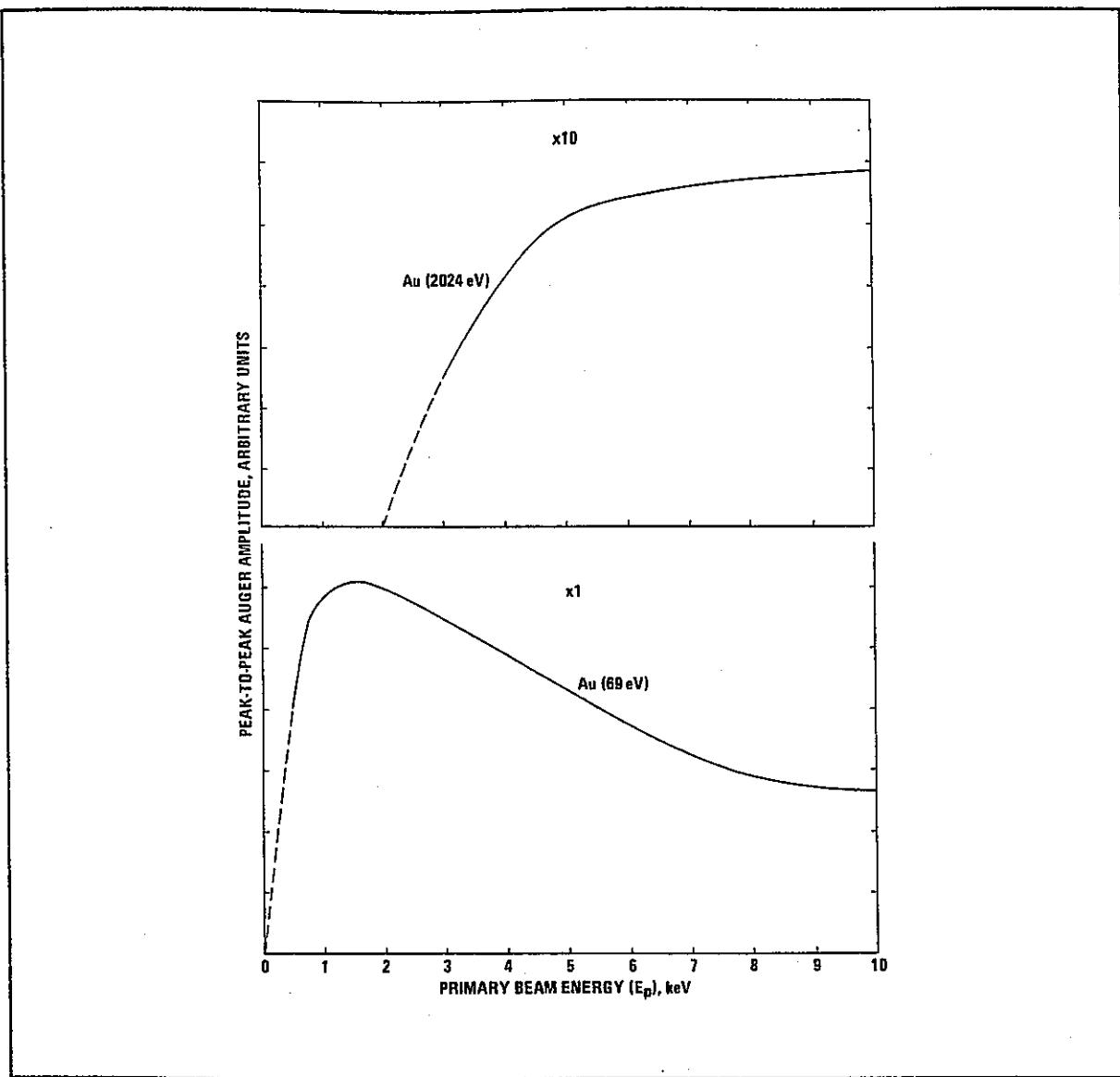


Figure 5: Dependence of Auger peak-to-peak amplitude on primary beam energy, E_p , for the Au(69 eV) and Au(2024 eV) peaks; $I_p = 2 \mu\text{A}$, $E_m = 2 \text{ eV}$ peak-to-peak.

from a pure elemental standard. In this approximation, the atomic concentration of element X in the sample is:

$$C_X = \frac{I_X}{I_{X,STD}} \quad (4)$$

where I_X and $I_{X,STD}$ are the peak-to-peak Auger amplitudes from the sample and standard respectively. For greater accuracy, a pure elemental standard should be mounted in the system with the specimen of interest. The peak-to-peak Auger signal from each sample can then be compared under identical experimental conditions. When the element of interest produces several Auger peaks, the same peak for the two specimens must be used for this comparison. It should be noted that surface layer contamination must be removed from both specimens in order to obtain true measurements of I_X and $I_{X,STD}$.

Another method, which avoids the need for a large number of pure elemental standards, is to compare the signal from the specimen with that from a pure silver target. The relative sensitivity, S_X , between any element, X, and silver can be obtained from the standard Auger spectra in this handbook using:

$$S_X(E_p) = \left(\frac{A+B}{A} \right) \frac{I_X^H}{K_X I_{Ag}^H} \quad (5)$$

where I_X^H and I_{Ag}^H are the peak-to-peak amplitudes from the handbook spectra of element X (with the desired E_p) and silver, respectively. K_X is the handbook scale factor ($K_{Ag} = 1$) printed above the portion of the spectrum of interest. A and B are the chemical formula indices of compound $X_A Y_B$ and are used to make a first order correction for the

density of atom X in the analysis volume. A more accurate correction can be made by using the ratio of the number density of X atoms in its elemental state to the number density of X atoms in the compound.

To determine the atomic concentration with this technique, E_p should be set at the value used for the handbook data and E_m should be low enough to prevent significant distortion due to excessive modulation. Without changing the electron multiplier voltage or E_p (vary only I_p , E_m , and lock-in sensitivity), the spectrum is obtained from the test specimen. The atomic concentration of element X is, then:

$$C_X = \frac{I_X}{I_{Ag} S_X D_X} \quad (6)$$

where I_X is the peak-to-peak amplitude of the element X from the test specimen, I_{Ag} is the peak-to-peak amplitude from the Ag standard and D_X is a relative scale factor between the spectra for the test specimen and silver. If the lock-in amplifier sensitivity, L_X , modulation energy, $E_{m,X}$, and primary beam current, $I_{p,X}$ settings used to obtain the test spectrum are different from those of the Ag spectrum (i.e. L_{Ag} , $E_{m,Ag}$ and $I_{p,Ag}$) the relative scale factor is:

$$D_X = \frac{L_X E_{m,X} I_{p,X}}{L_{Ag} E_{m,Ag} I_{p,Ag}} \quad (7)$$

When elemental or silver standards are not used, it is possible to express the atomic concentration as:

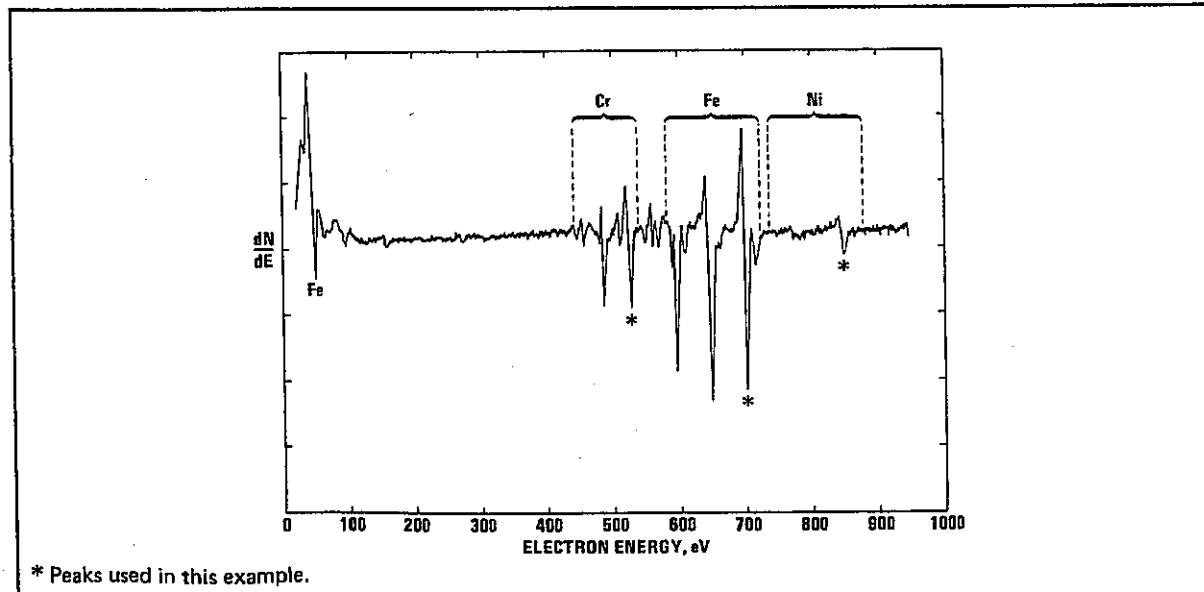
$$C_X = \frac{I_X}{S_X d_X} \quad / \quad \sum_{\alpha} \frac{I_{\alpha}}{S_{\alpha} d_{\alpha}} \quad (8)$$

where I_X and S_X are defined as before, the summation is over one peak per element and d_X is the scale factor defined by:

$$d_X = L_X E_{m,X} I_{p,X} \quad (9)$$

To facilitate the use of the latter method, relative elemental sensitivity factors $S_X(E_p)$ of the more useful transitions obtained at $E_p = 3, 5$, and 10 keV are presented in graphical form in section I.5 below. In each case, S_X values obtained from spectra of elemental or compound standards are relative to the Ag (351 eV) peak in the handbook according to equation (5). The data have been normalized so that $S_{Ag} = 1$ with $E_p = 3$ keV.

As an example of how the relative sensitivity factors are to be used, equation (8) was applied to Auger peak-to-peak amplitudes of a ductile fracture surface of 304 stainless steel. Such a surface prepared in situ in a UHV environment exhibits the bulk composition of the material. Since the low energy Auger peaks are generally more susceptible to distortion by magnetic effects and localized specimen charging it is best to use peaks occurring above about 100 eV for quantitative analysis. Therefore, the Fe(703 eV) peak rather than the Fe(47 eV) peak was chosen in this example and as shown in Figure 6, the relative peak amplitudes of the Fe(703 eV), Cr(529 eV), and Ni(848 eV) peaks were 10.1, 4.7 and 1.5 respectively (in any



* Peaks used in this example.

Figure 6: Auger spectrum from ductile fracture surface of 304 stainless steel used to illustrate quantitative Auger analysis; $E_p = 3$ keV, $E_m = 4$ eV peak-to-peak, $I_p \approx 2 \mu\text{A}$.

arbitrary units). The relative sensitivity factors for these peaks calculated using equation (5) are 0.20, 0.29 and 0.27, respectively. The scale factor d_x is the same for all peaks and therefore cancels out. Application of equation (8) to the Fe(703 eV) peak in this specimen yields:

$$C_{Fe} = \frac{10.1/20}{10.1/20 + 4.7/29 + 1.5/27} = 0.70$$

Similar calculations applying equation (8) to the Cr(529 eV) and Ni(848 eV) peaks give: $C_{Cr} = 0.22$ and $C_{Ni} = 0.08$. The known bulk concentrations of this alloy are $C_{Fe} = 0.702$, $C_{Cr} = 0.205$ and $C_{Ni} = 0.093$ which compare favorably with surface concentrations obtained from the Auger data.

There are several inherent errors in these simple quantitative techniques. These are: (1) matrix effects on electron escape depths and backscattering factors, (2) chemical effects on peak shapes, and (3) surface topography. For example, the dependence of Auger electron escape depth on the electronic structure of the host material may alter

the depth of measurement in the specimen relative to that in a standard. Since the magnitude of the Auger signal is proportional to the number of atoms in the analysis volume, a larger escape depth will cause a corresponding increase in Auger signal (as long as the element of interest is distributed throughout the escape depth layer). Chemical effects can change the peak shape and thus lead to error when using peak-to-peak heights in the differentiated spectrum for a measure of the Auger signal. Generally, a highly polished surface produces a larger Auger signal than a rough surface. This effect is minimized by determining concentrations from equation (8) since surface roughness is expected to decrease all Auger peaks by nearly the same percentage.

When highly accurate quantitative analysis is desired, standards of known concentrations which are close to that of the actual specimens should be used. In this way, electron escape depths, backscattering factors, and chemical effects are similar in both samples.

5. Relative Elemental Sensitivity Factors

The relative elemental sensitivity factors, S_x , presented graphically in the following pages were obtained from pure elements and compounds using primary beam energies of 3, 5, and 10 keV. As discussed in the Quantitative Analysis Section (I.4),

the atomic concentration of element X may be obtained from equations (6) or (8) using S_x values. The S_x values plotted here have been identified with specific transitions in the Handbook spectra and are appropriate only for those transitions.

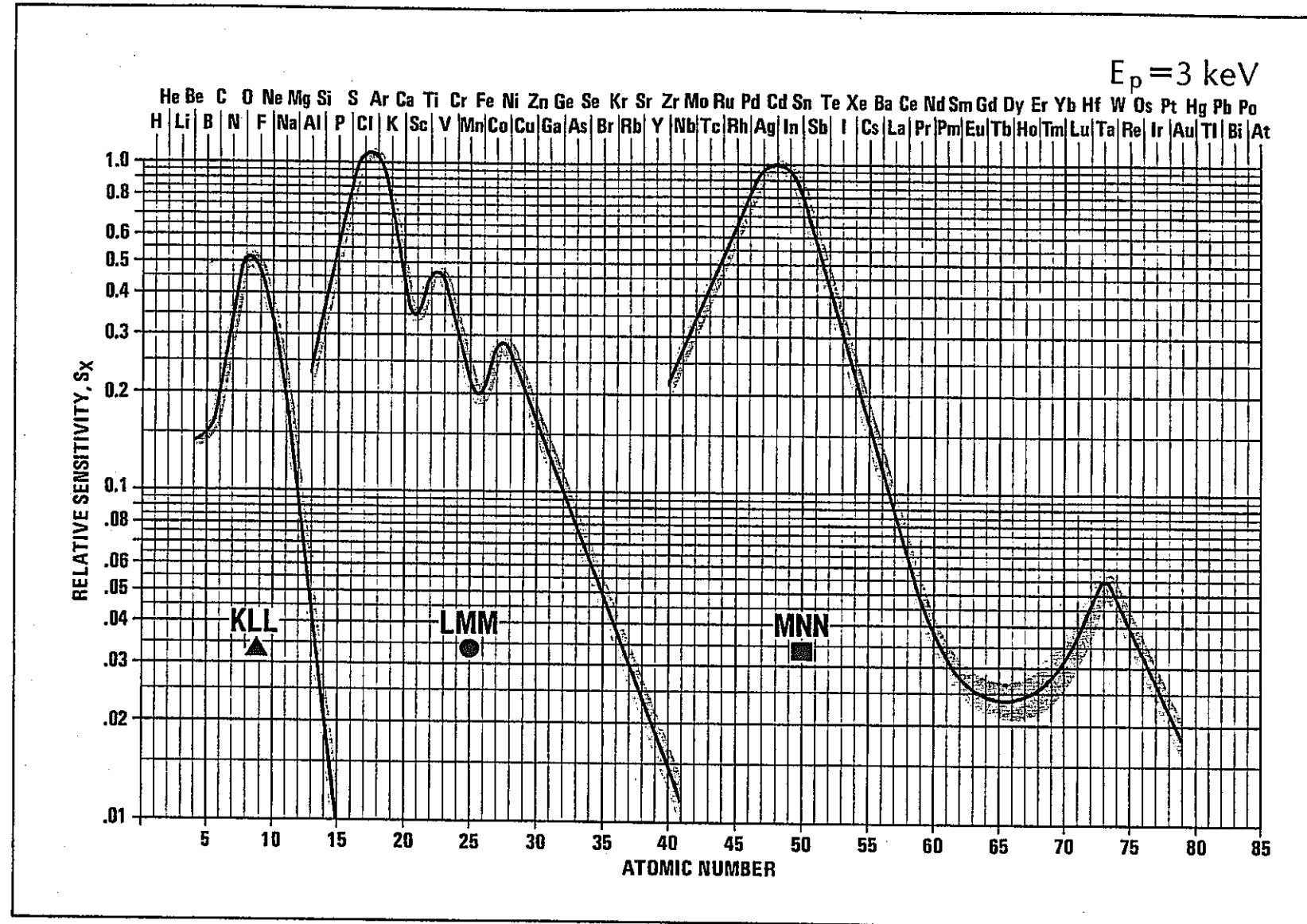
Peaks used to calculate the sensitivity curves of KLL transitions are marked on the spectra by ▲; those used for the LMM transitions by ●; and those used for the MNN transitions by ■. The peaks for which S_x values are plotted are those normally used to detect and determine concentrations of the elements. The sensitivity factor for any other peak in the Handbook may be obtained using equation 5.

Higher energy (>100 eV) transitions have been emphasized because these peaks are less subject to distortion by magnetic field and sample charging effects. In some cases average values of S_x were used. For example, three measurements were obtained for the Fe(703eV) peak at $E_p = 3$ keV. The S_{Fe} value plotted is the average of these measurements and is within $\pm 5\%$ of the measured values. Larger uncertainties (about $\pm 20\%$) are expected in S_x values for elements obtained from insulating standards.

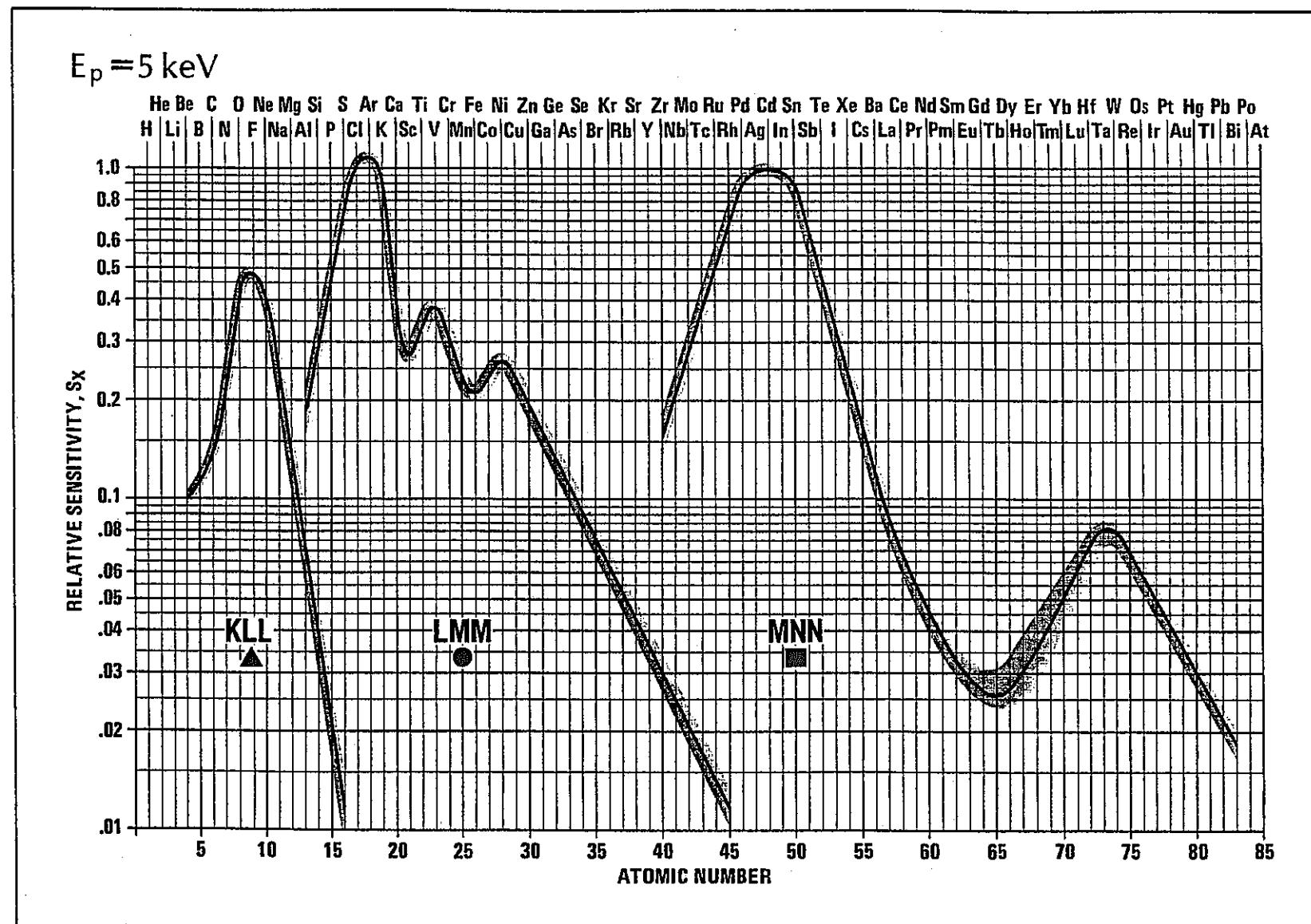
Also a few of the 5 and 10 keV values were estimated from the 3 keV values and data on the dependence of the sensitivity on excitation energy. For example the sensitivity factor for the lutetium (1573 eV) peak can be estimated from the 3 keV lutetium data using the peak-to-peak height ratio for the silicon (1619 eV) peak at 3 and 5 keV.

The curves presented below should be considered a "best fit" to average and interpolated values and will not necessarily be identical with sensitivity factors calculated directly from handbook spectra. An estimate of the accuracy of the plotted S_x values is shown by the shaded areas surrounding the solid curves in the graphs. The relative elemental sensitivity factors in this section are not suggested as replacements for internal standards. A higher degree of accuracy can be achieved by using a standard with a chemical matrix similar to that of the test specimen.

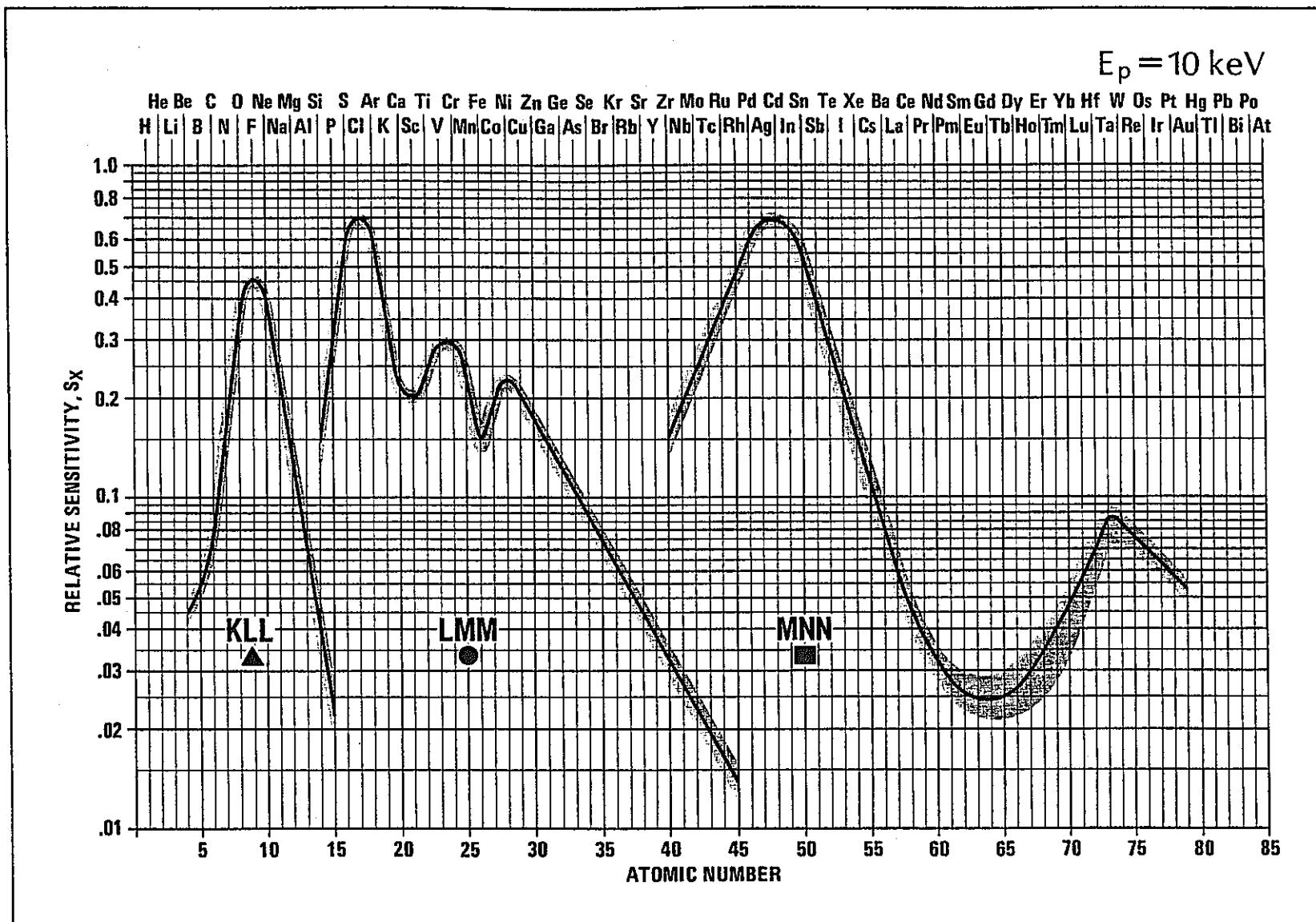
Relative Auger Sensitivities of the Elements



Relative Auger Sensitivities of the Elements



Relative Auger Sensitivities of the Elements



6. Chart of Principal Auger Electron Energies—Description

The PHI Chart of Principal Auger Electron Energies (Inside Back Cover) indicates the relationship between the energies of the principal observed Auger transitions and atomic number. The dots indicate experimental values of the energies at which principal negative peaks occur in the Auger spectrum. The large dots indicate the most intense peaks obtained from each element. These are the peaks normally used for quick identification of the

elements. The Auger transitions which give rise to the observed peaks are also indicated. For example, a KLL transition involves initial ionization of the K shell and relaxation of an electron from the L shell into the K vacancy. Energy released in this process is transferred to another L electron which is consequently ejected from the specimen with characteristic energy and can be identified as an Auger electron.

-37-

7. Standard Auger Spectra of the Elements—Description

The spectra presented in this handbook were obtained from pure elemental materials or from compounds of known composition. The sensitivity of the instrument, relative to that used to obtain the silver spectrum with 3 keV excitation is indicated by scale factors on each graph. The energy, E_p , of the electron beam used for excitation is also indicated since spectra obtained using 5 keV as well as 3 keV excitation are included when they

provide information not contained in the 3 keV spectra.

For spectra from elemental standards, the energy of each peak is labeled on the graph. Following conventional procedures, the numbers indicate the energies of the negative peaks in the Auger spectrum. When a peak originates from an impurity, the chemical symbol of that impurity is used to

label the peak. For compound standards, the transitions due to the element under consideration are labeled by chemical symbol and energy while other constituents and impurities are labeled by chemical symbols only. The compound used is indicated on these spectra.

The peaks in each spectrum that were used to determine the S_X values plotted in Section I.5 are

marked by \blacktriangle , \bullet or \blacksquare respectively depending on whether the data fall in the KLL, LMM, or MNN segment of the S_X curves.

The energy scale is broken on many of the spectra to expand the low energy region and also include the high energy transitions. When an intermediate energy range is not recorded, no transitions of significant amplitude were present in that range.

8. How to Use This Handbook

The Handbook of Auger Electron Spectroscopy can be of greatest aid to the Auger spectroscopist when used according to the following procedures:

Qualitative Analysis:

Identification of species present can be most readily accomplished using the combination of the Chart of Principal Auger Electron Energies (Inside Back Cover) and the standard spectra as follows:

1. Concentrating only on major peaks, use the chart to reduce the number of possibilities to two or three elements.
2. Make positive identification of major constituents by referring to the standard spectra of the elements in question.
3. Label all peaks from dominant species.
4. Peaks which are not yet labeled originate from minor constituents whose identification proceeds as in steps 1 and 2 above. Because of low concentration, only the most prominent peaks of these elements will be observed in the spectrum.

Quantitative Analysis:

Quantitative information can be obtained using the standard spectra and a clean silver target as follows:

1. Calculate the relative sensitivity, S_X , between the element X of compound $X_A Y_B$ and silver from the Auger spectra in this handbook using:

$$S_X(E_p) = \left(\frac{A+B}{A} \right) \frac{I_X^H}{K_X I_{Ag}^H} \quad (5)$$

I_X^H and I_{Ag}^H are the peak-to-peak amplitudes of one peak in the handbook spectra for element X and silver respectively.

K_X is the scale factor on the handbook spectrum for element X.

2. Calculate the atomic concentration of element X using:

$$C_X = \frac{I_X}{I_{Ag} S_X D_X} \quad (6)$$

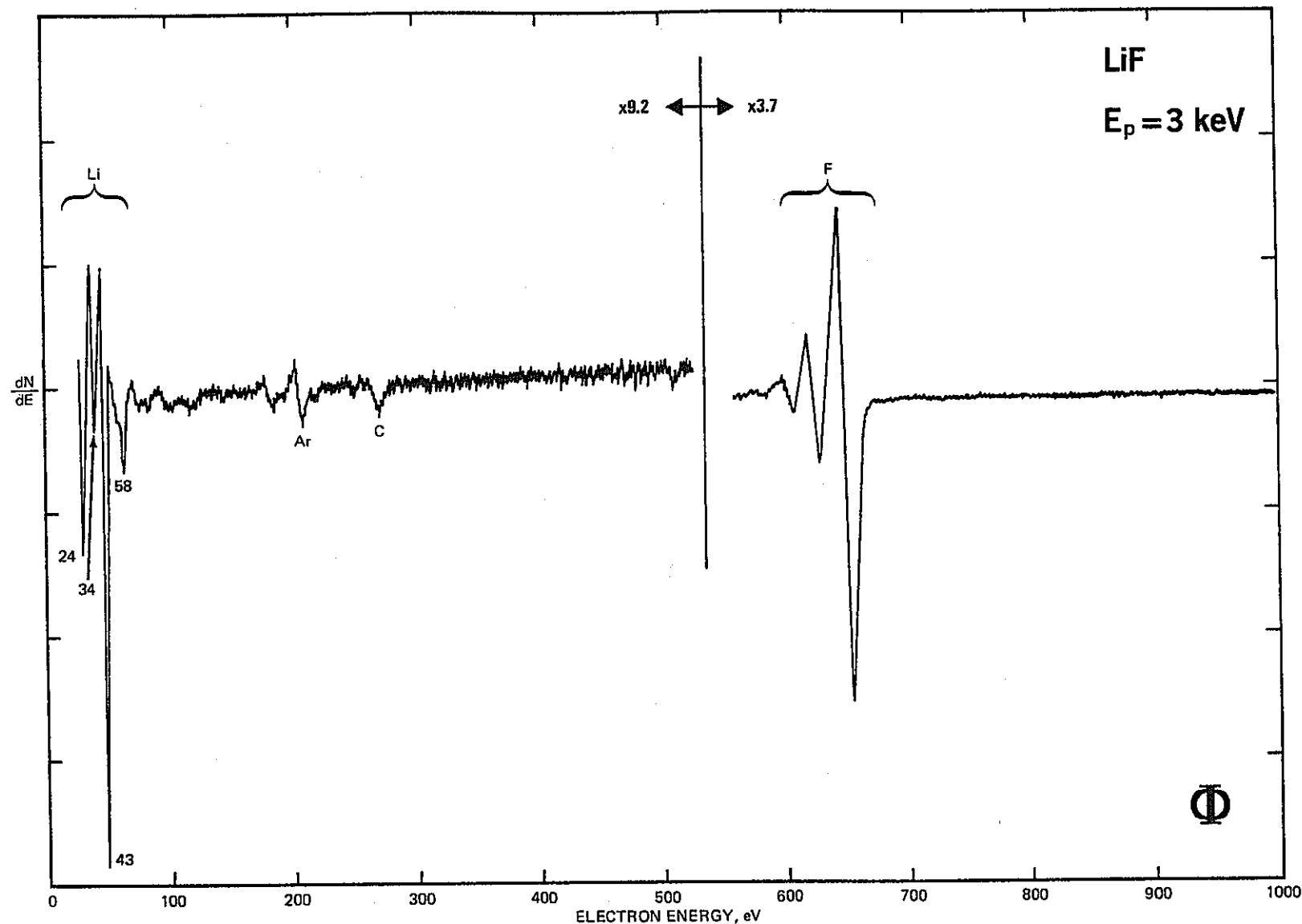
I_X and I_{Ag} are the peak-to-peak heights from the spectra of element X on the specimen and the pure silver target respectively and D_X is the scale factor as defined in equation (7) in section I.4 above. Note that the same pair of Auger peaks must be used to calculate C_X as were used to calculate S_X .

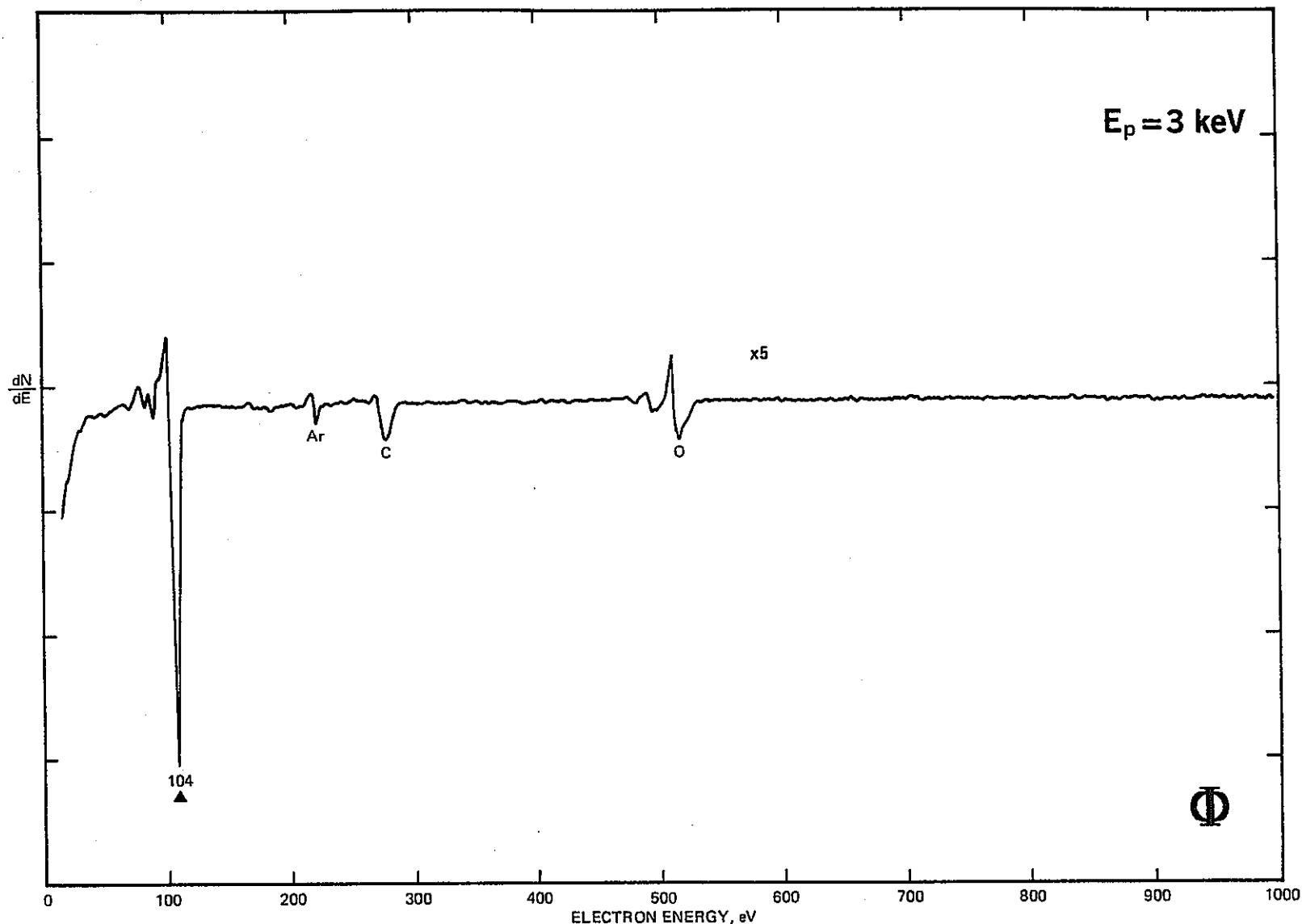
3. Approximate relative elemental sensitivity factors, S_X , have been listed in section I.5 of

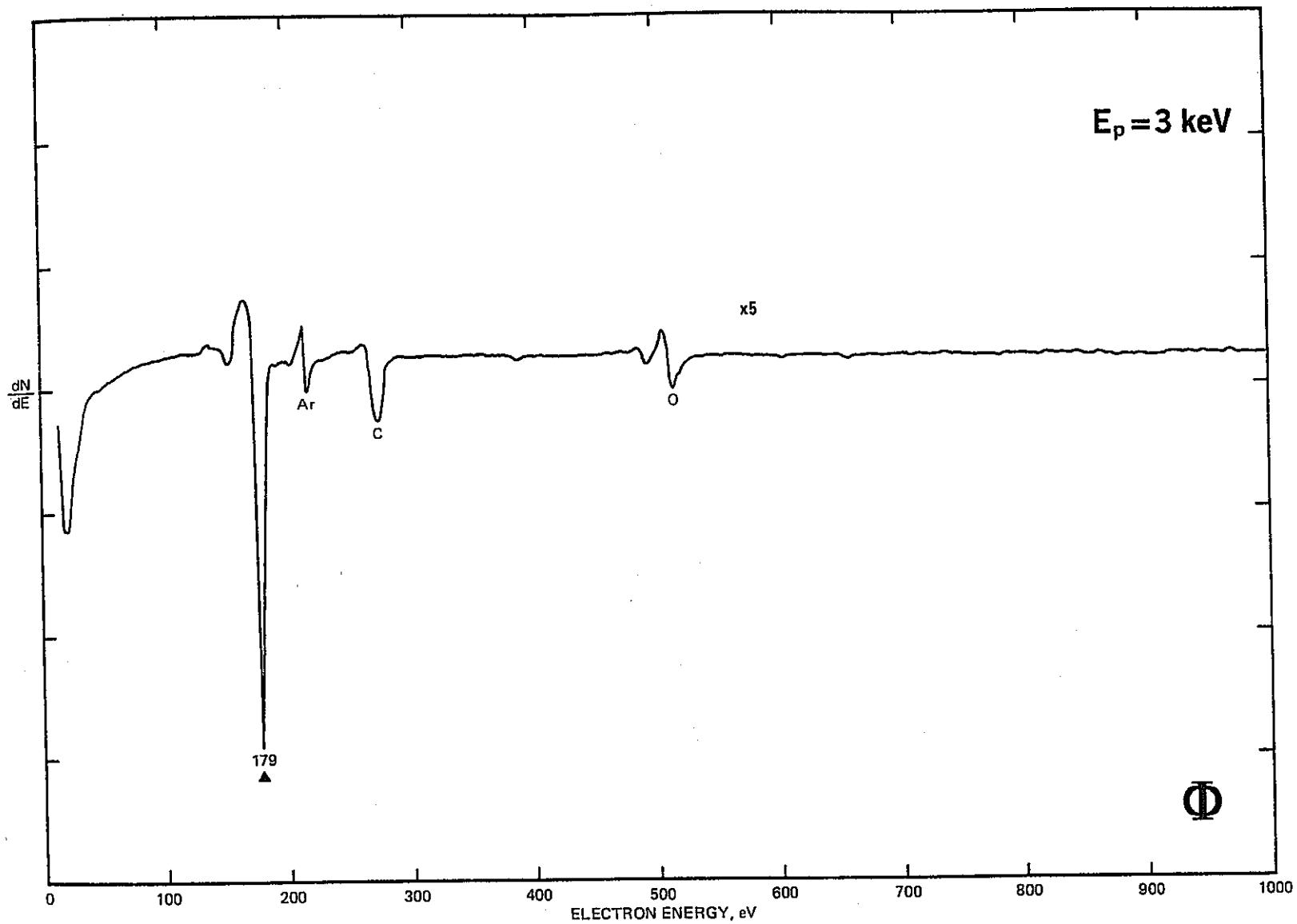
this handbook. These sensitivity factors can be used in lieu of the reference standard, as suggested in equation (8). However, it is again pointed out that the quantitative limitations of this technique can be severe (See section I.4 on quantitative analysis). The handbook spectra have been marked to indicate which peaks were used to obtain the elemental sensitivity factor curves in section I.5.

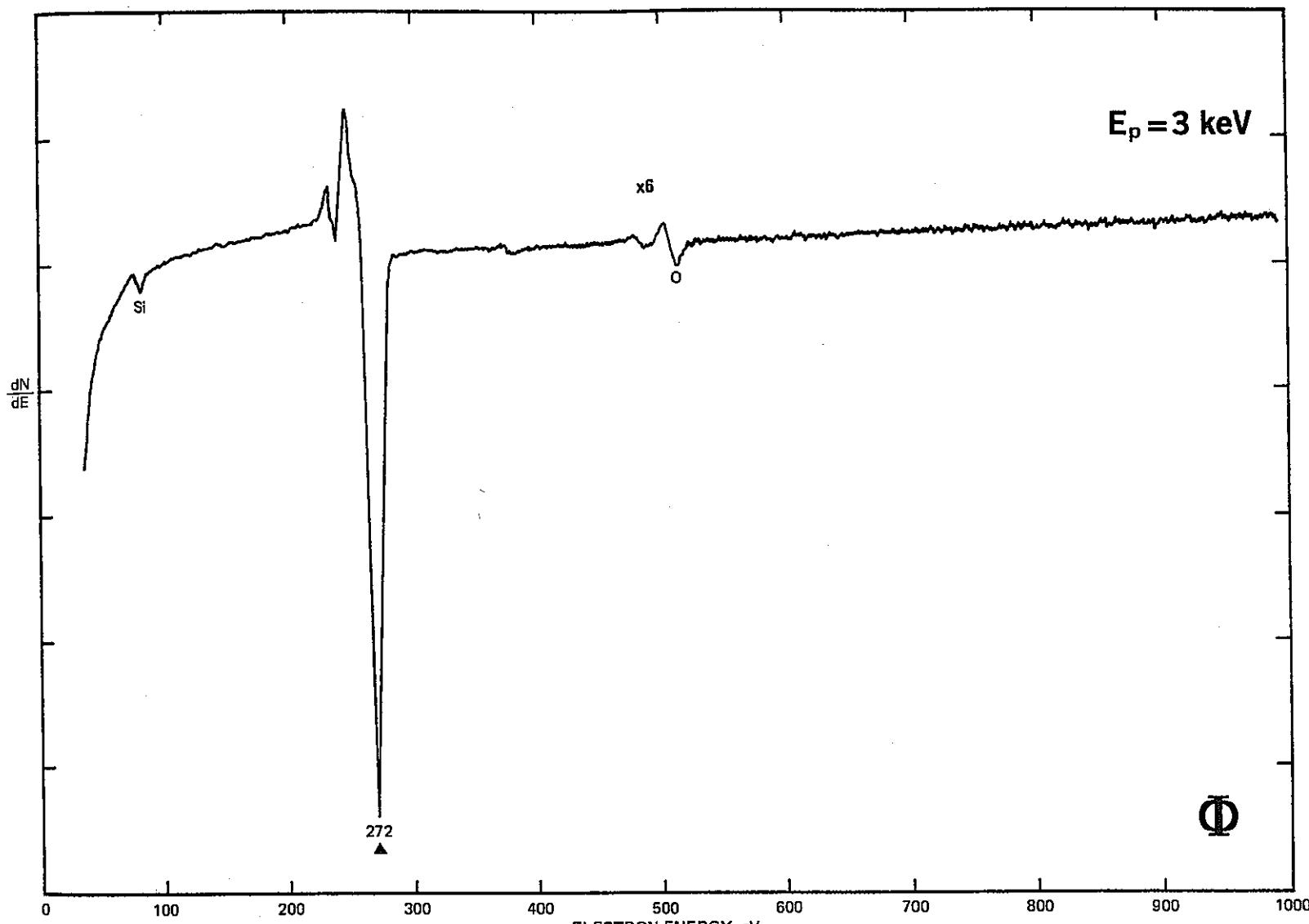
— 40 —

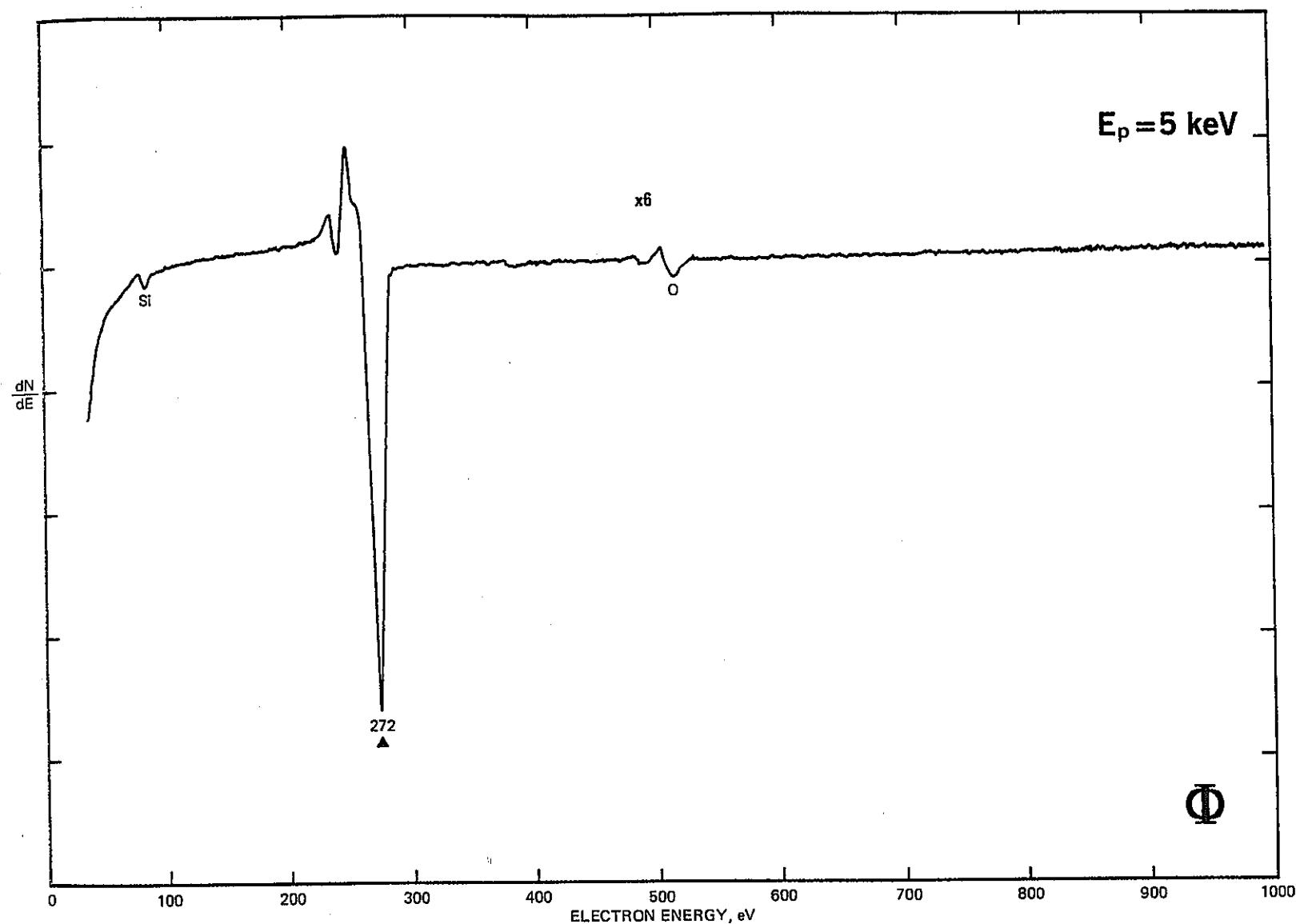
II. STANDARD AUGER SPECTRA OF THE ELEMENTS (In Order of Atomic Number)

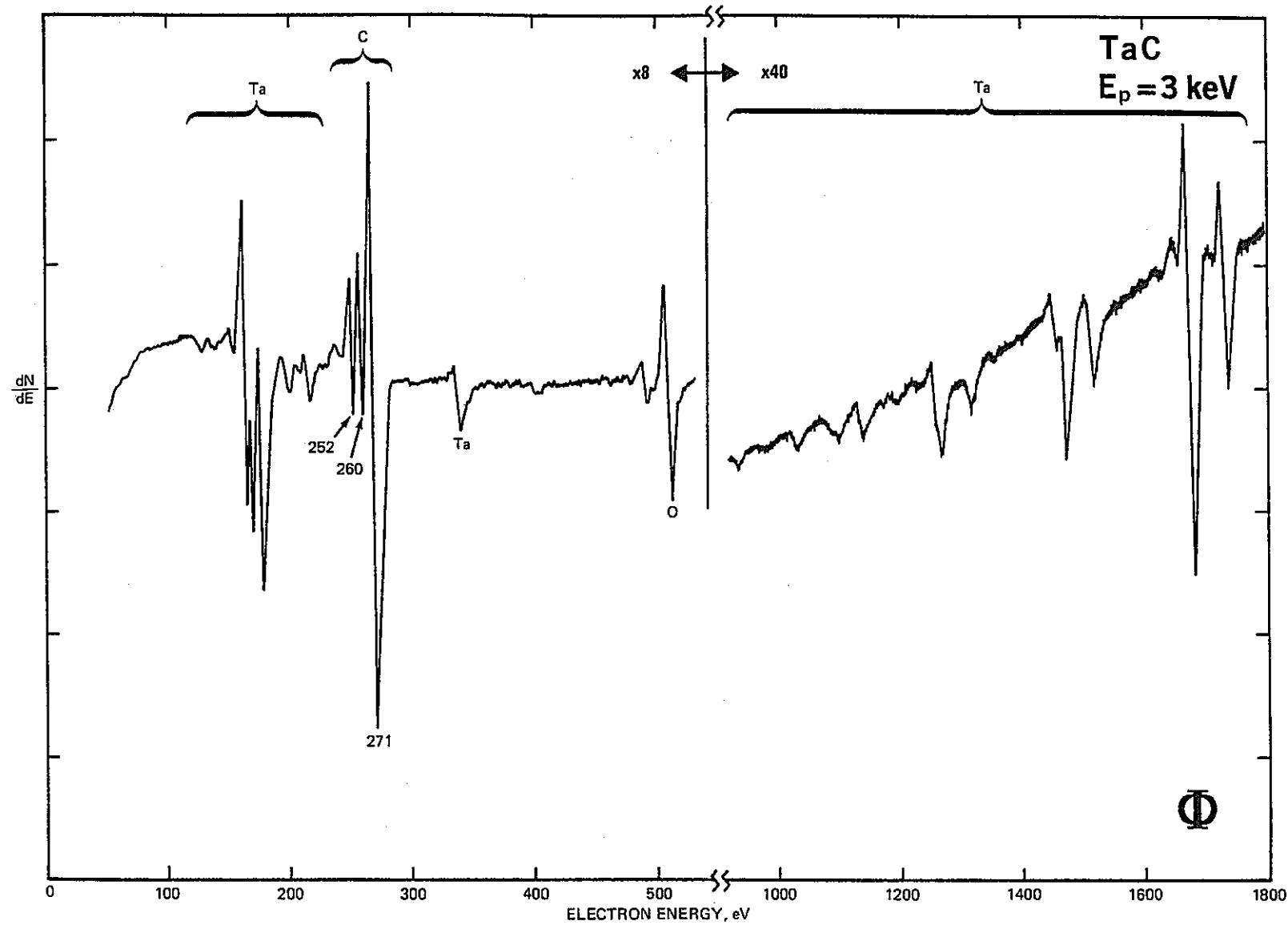




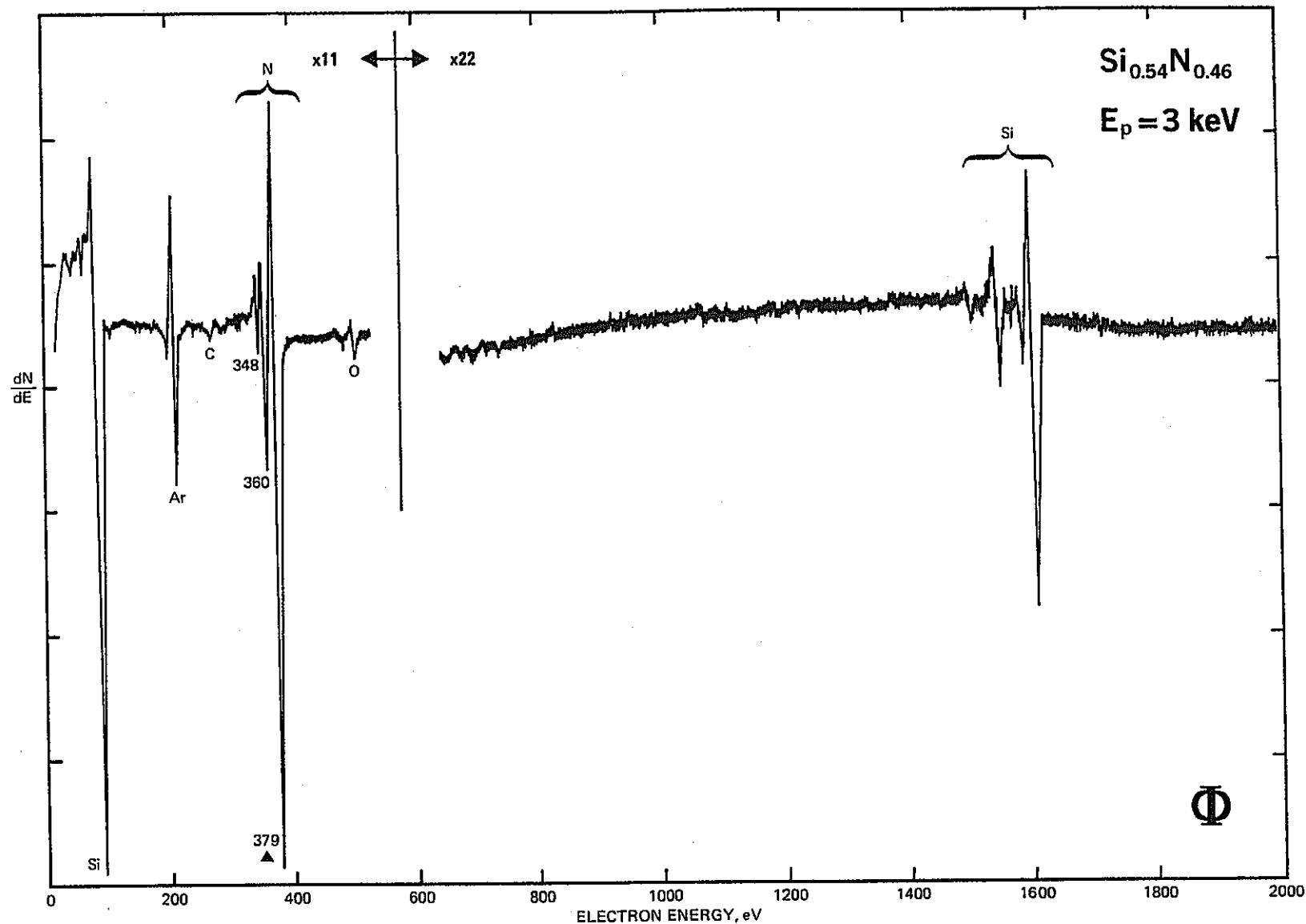


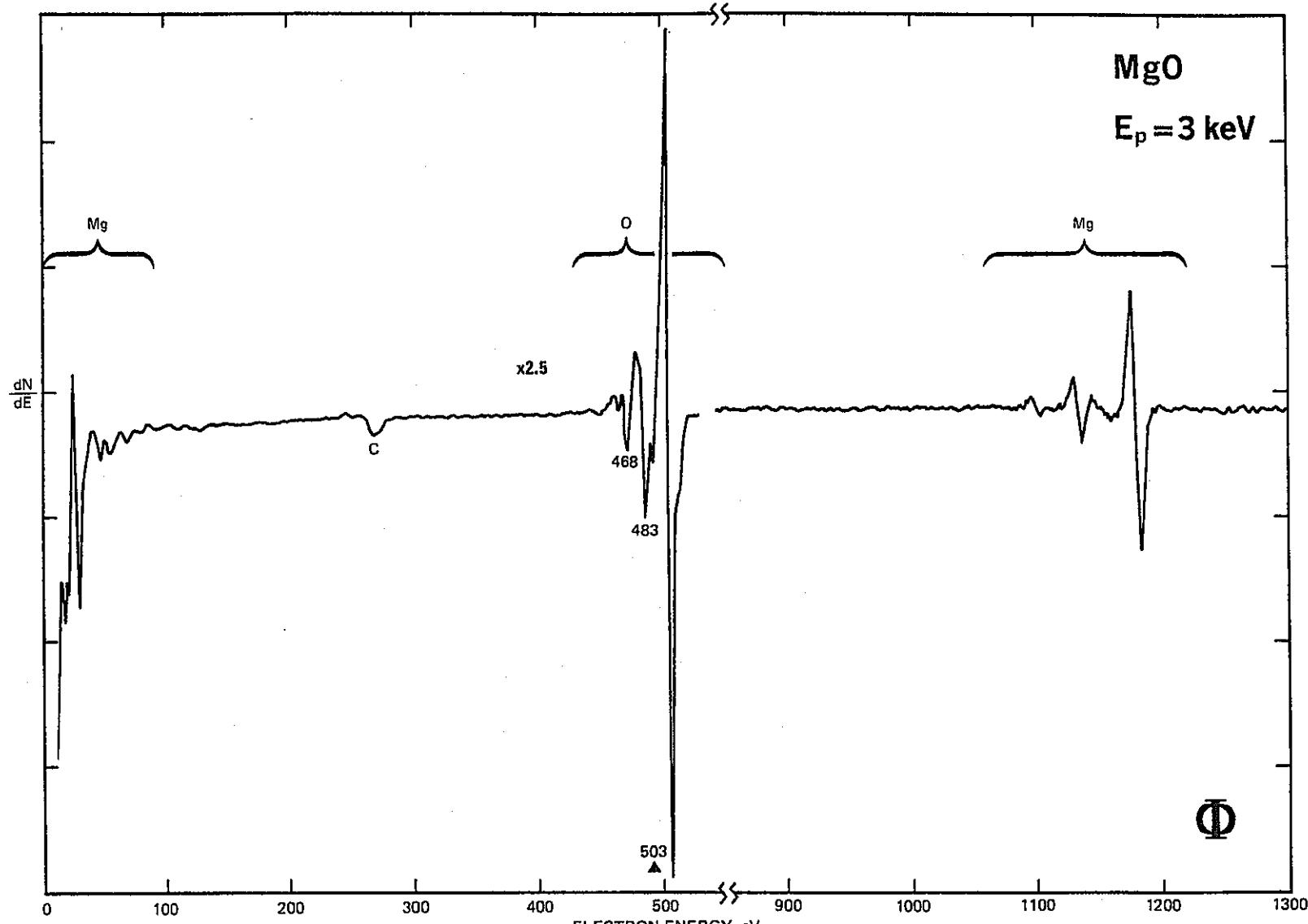


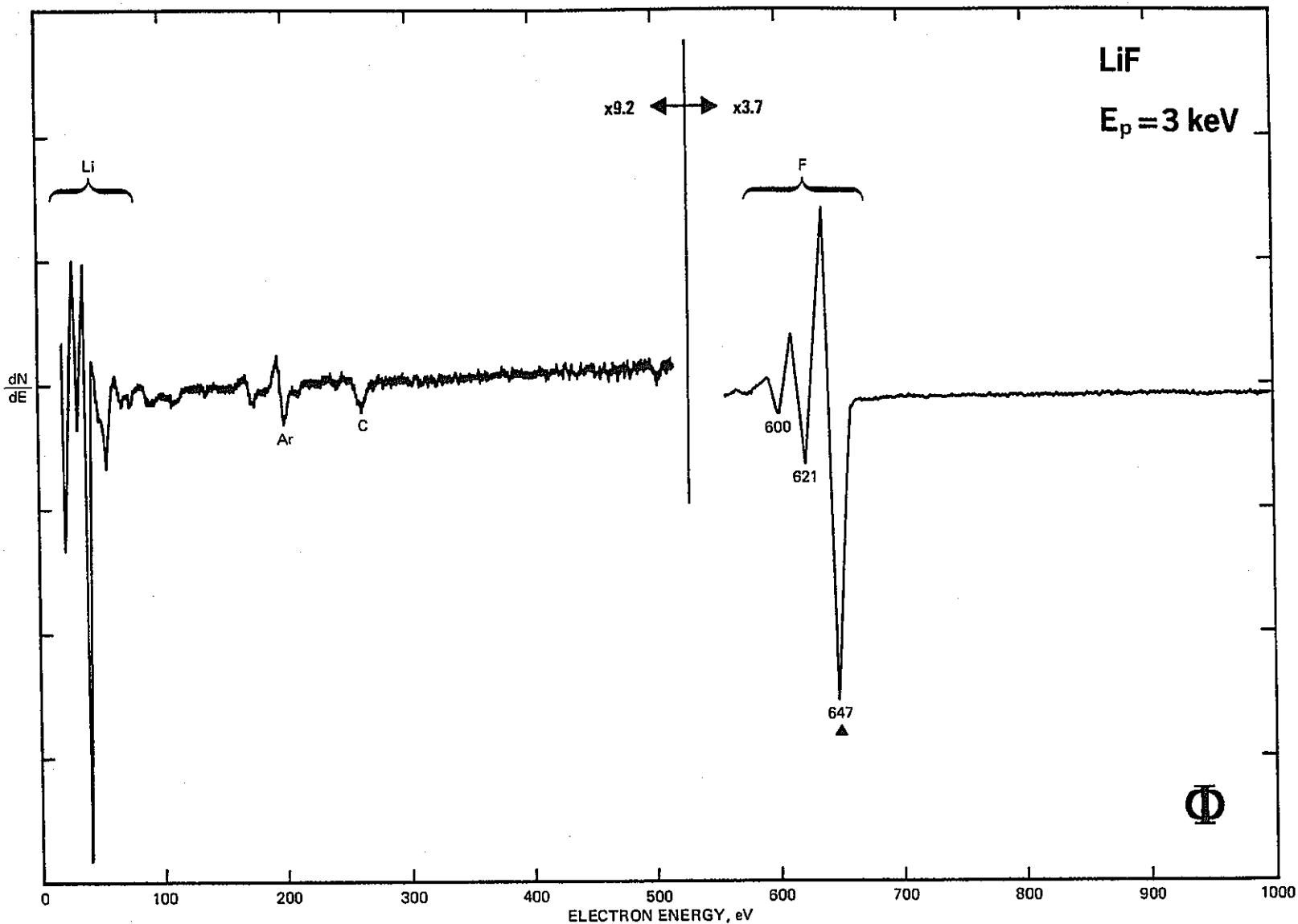


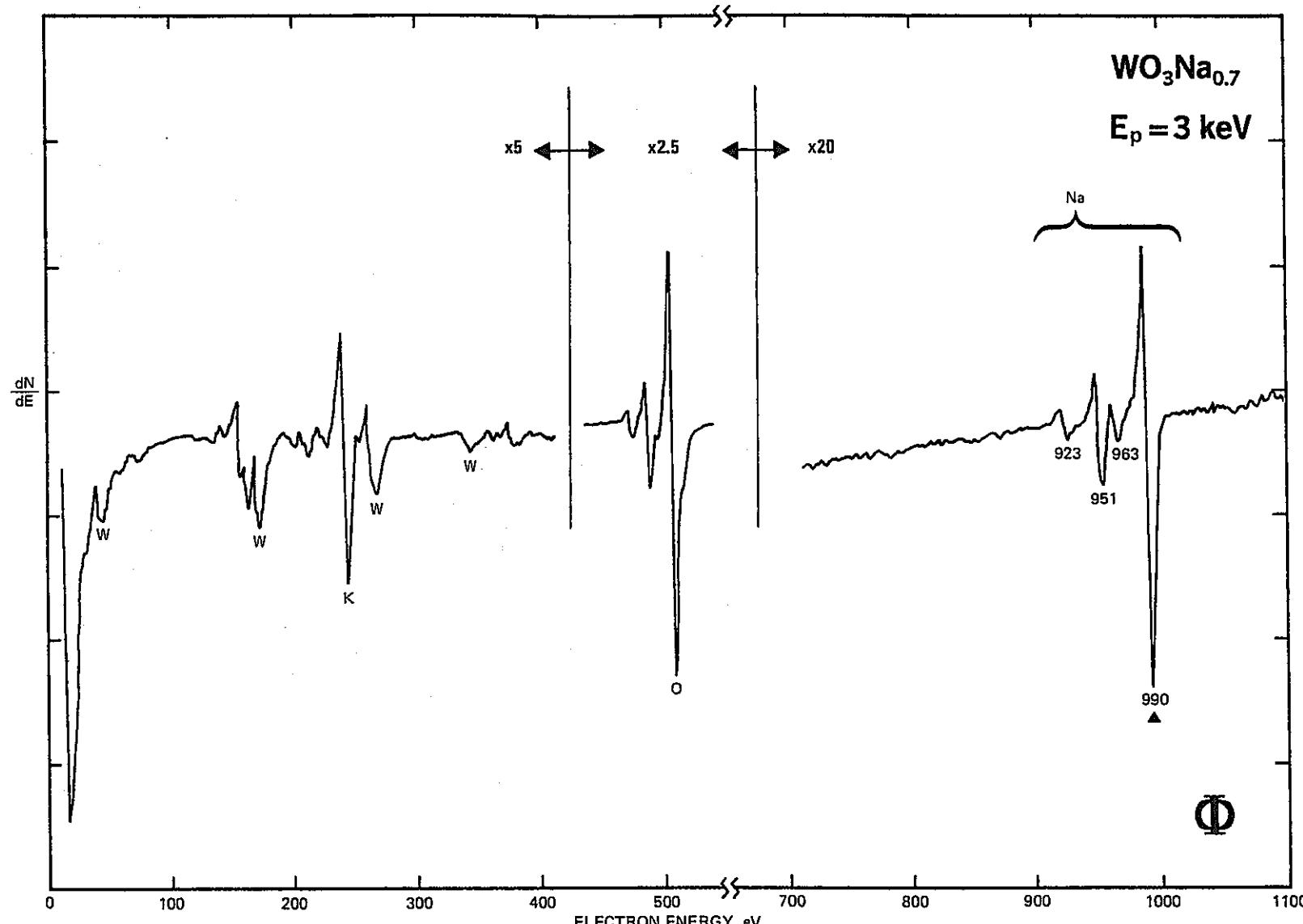


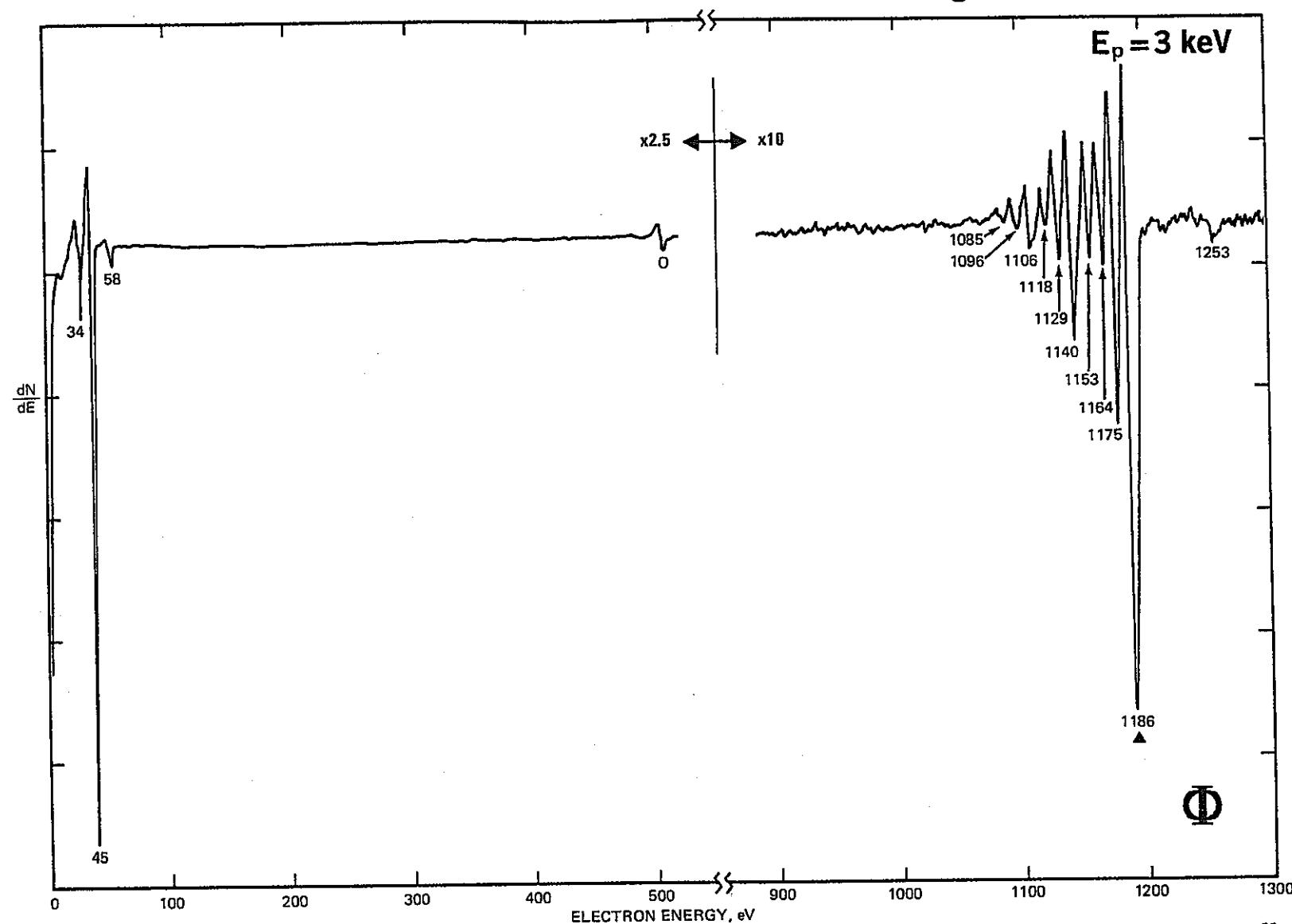
HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

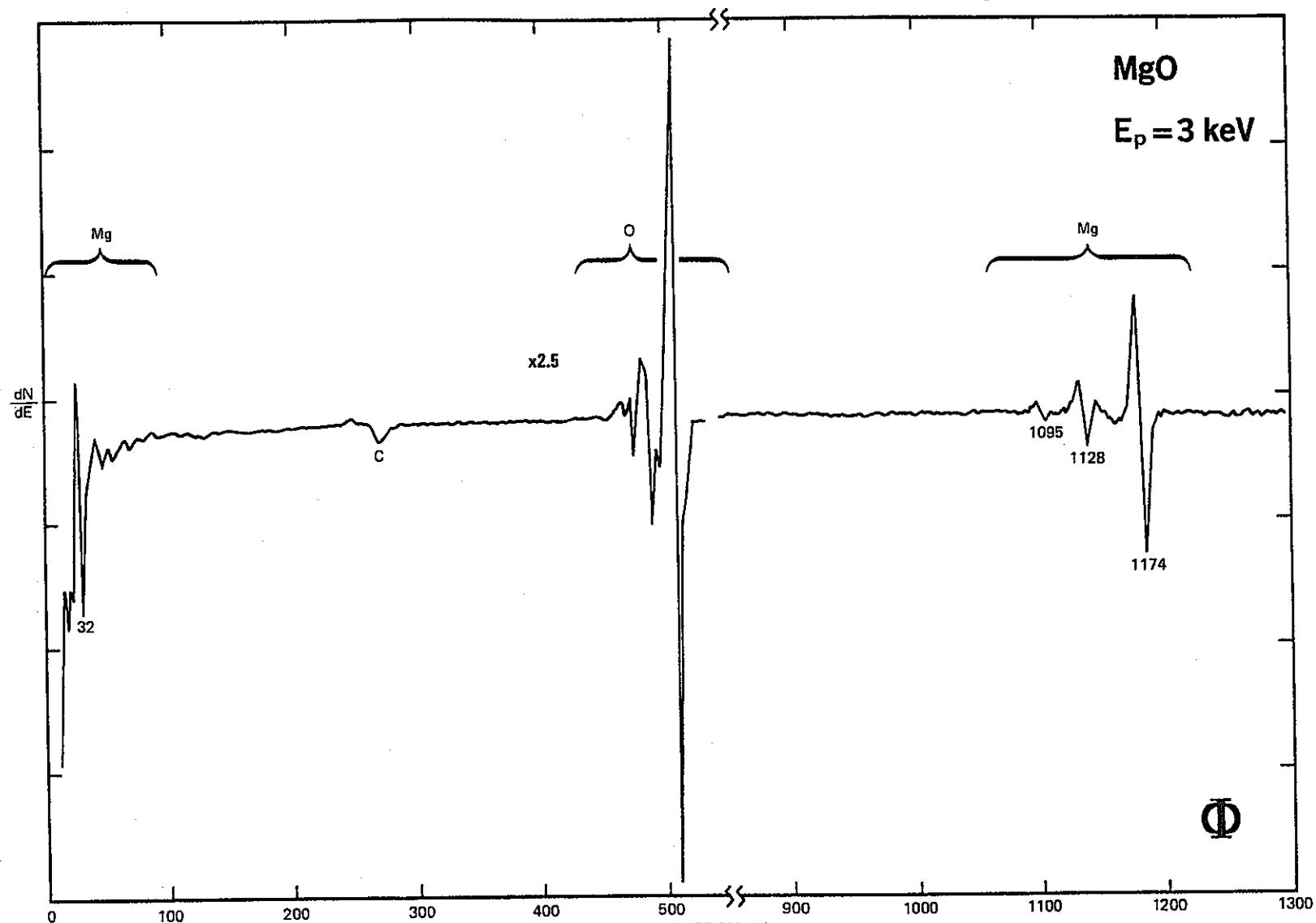
Nitrogen, N Atomic Number 7

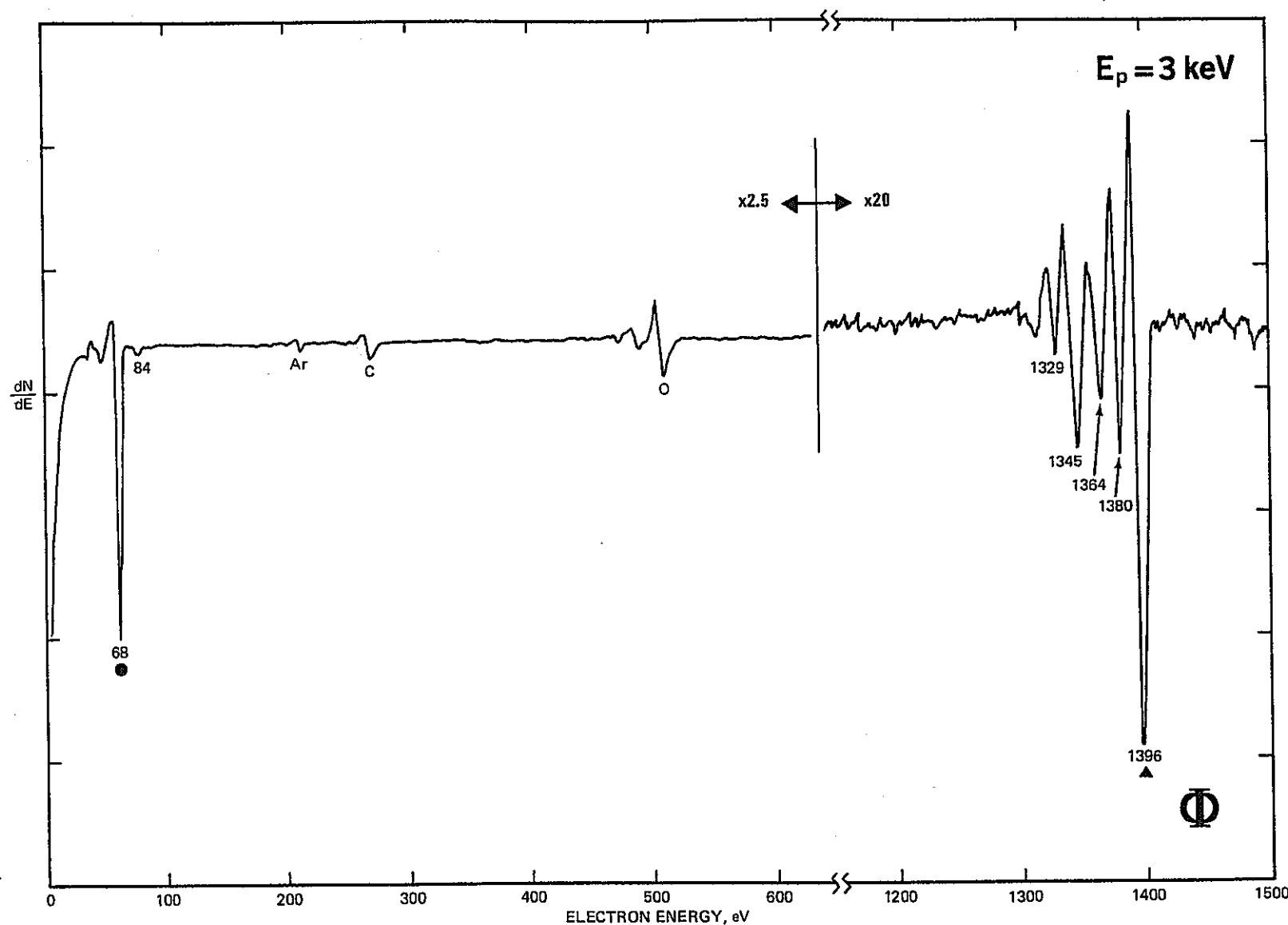


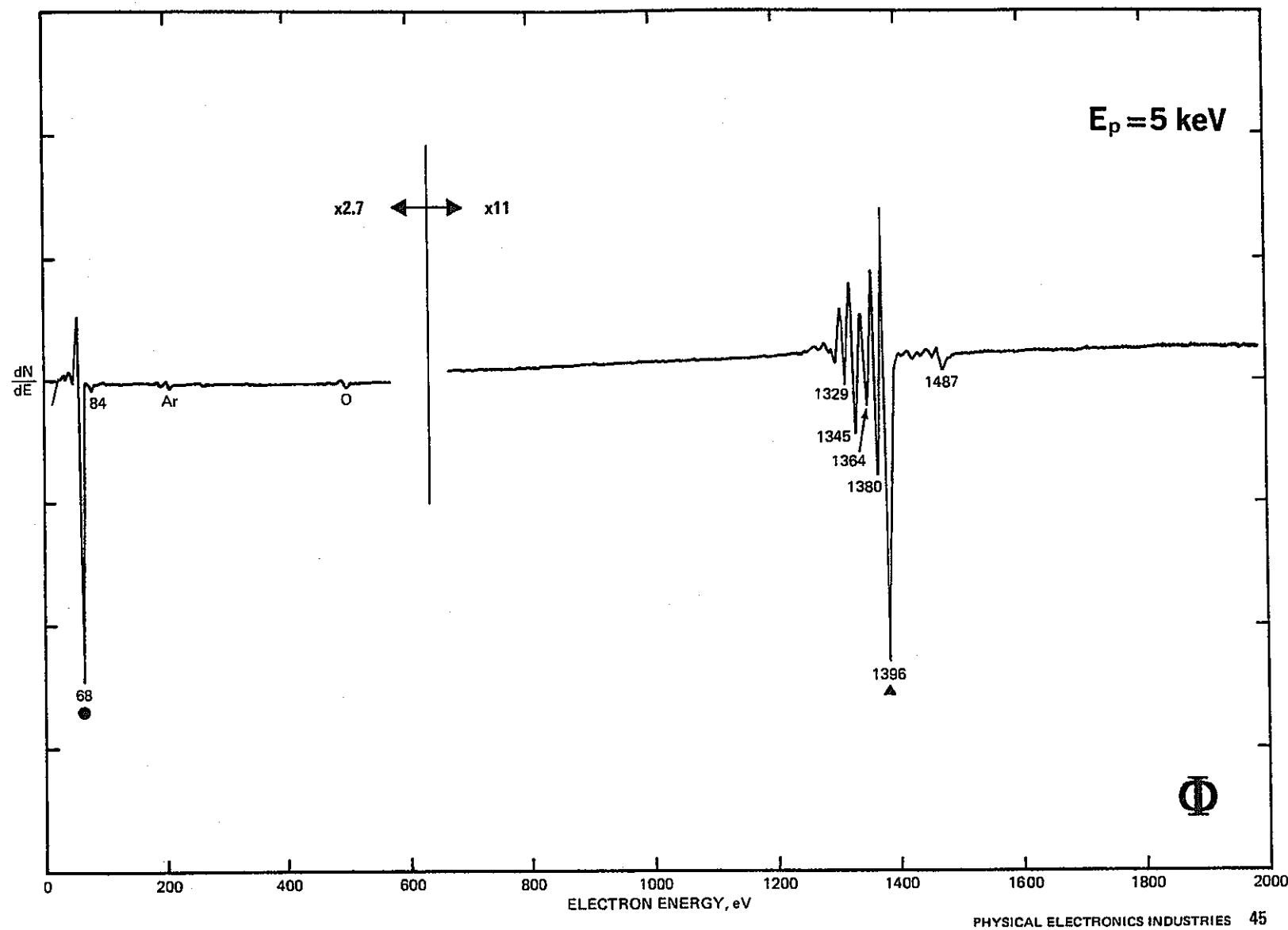




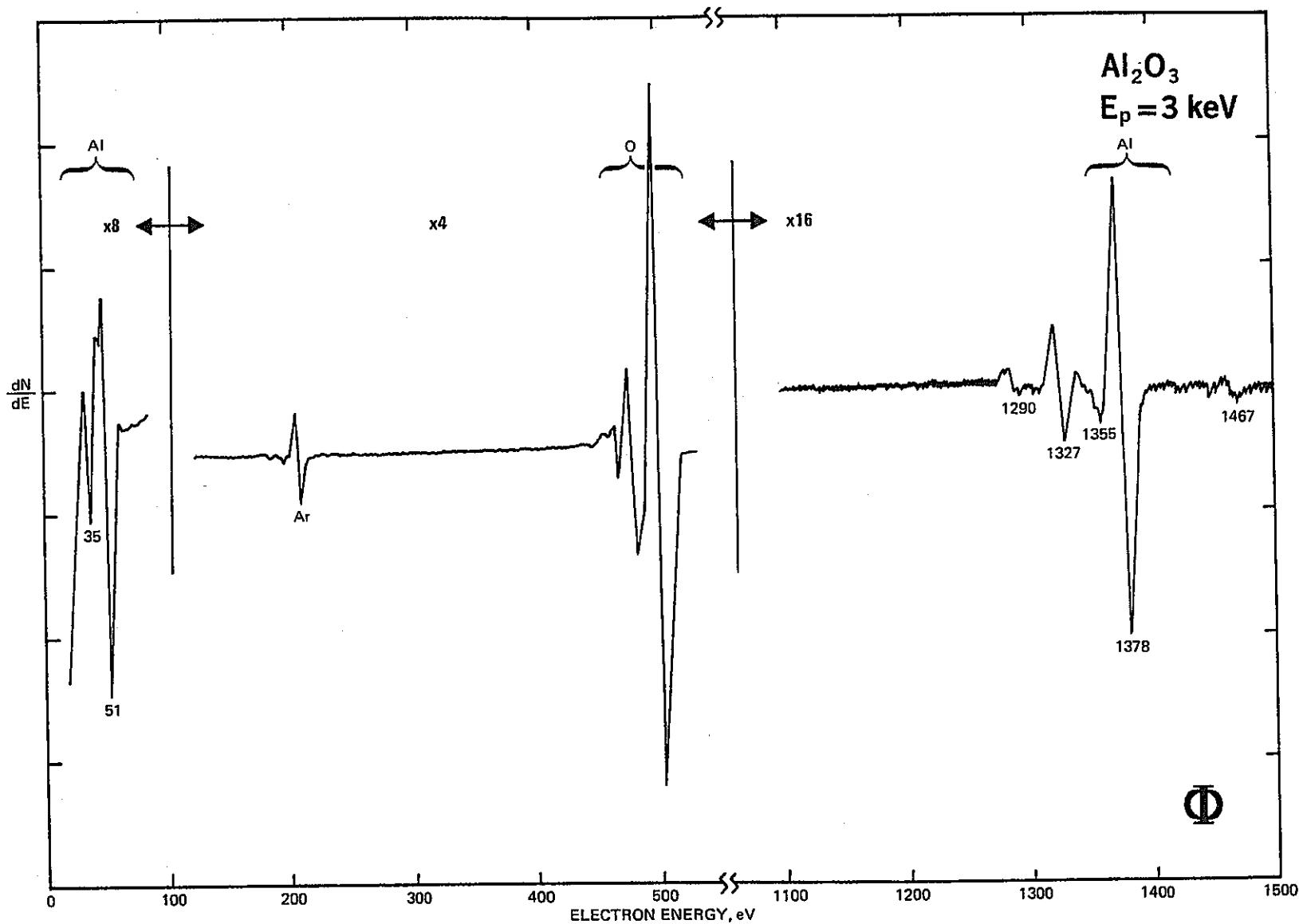
Magnesium, Mg Atomic Number 12

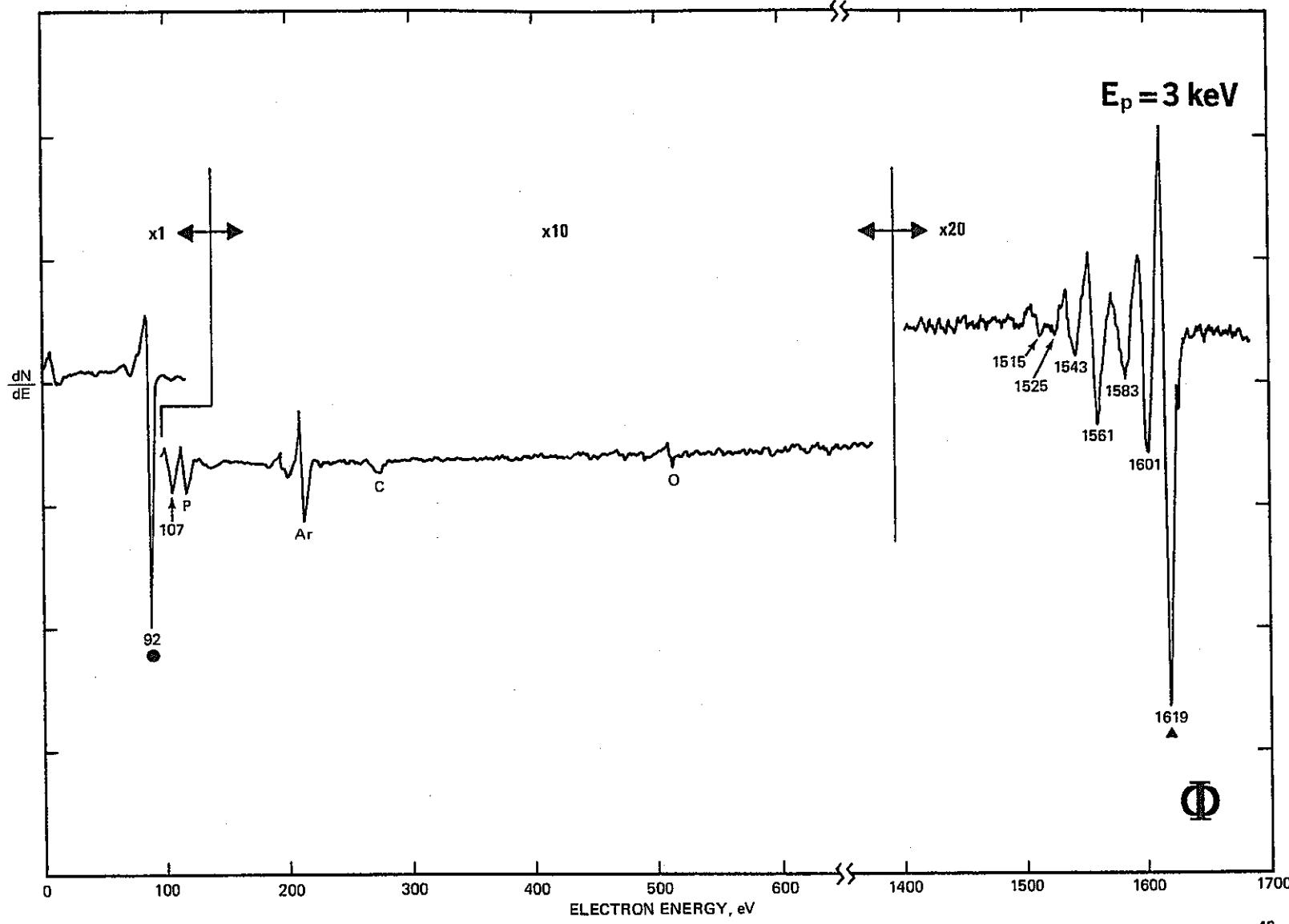




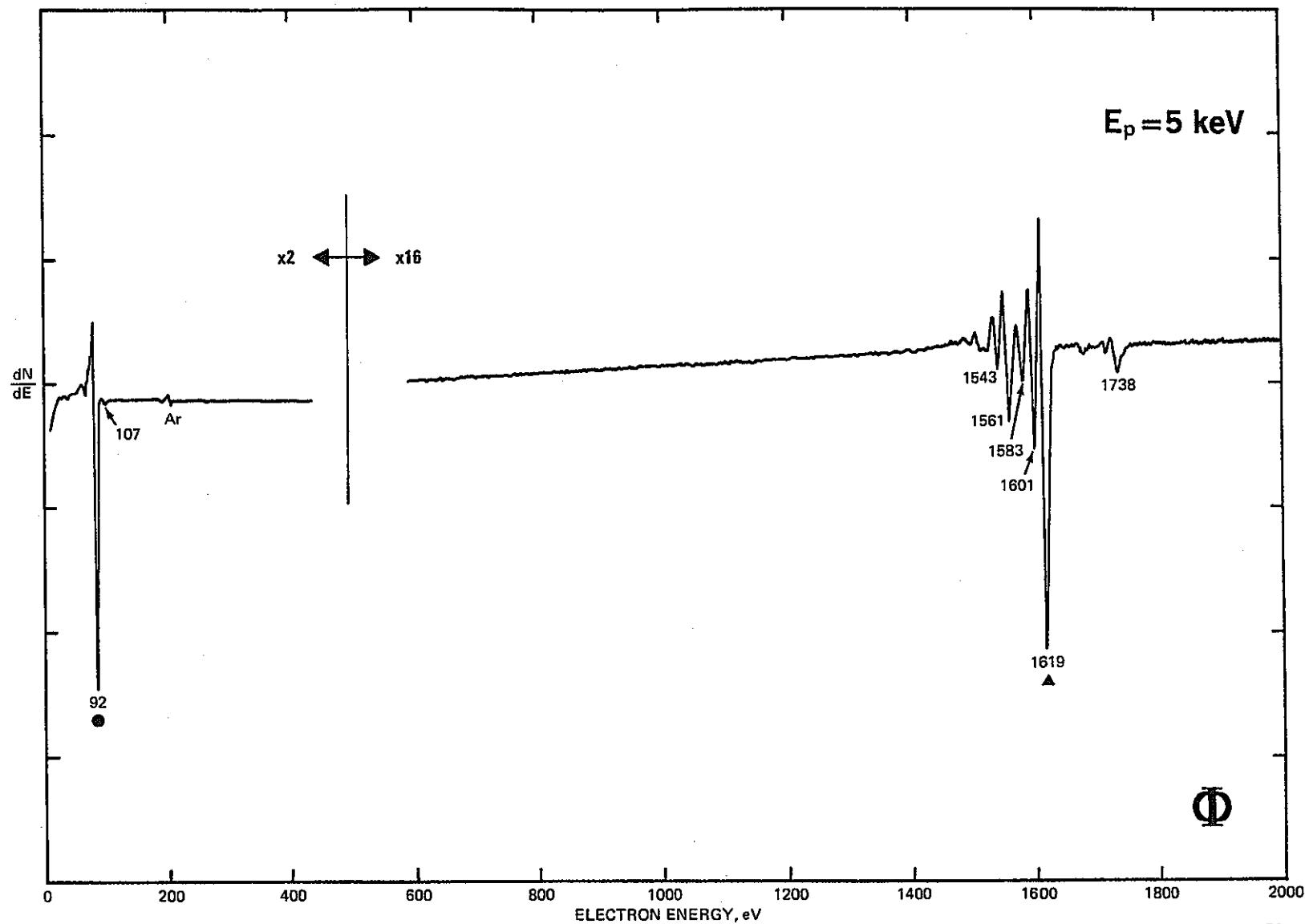


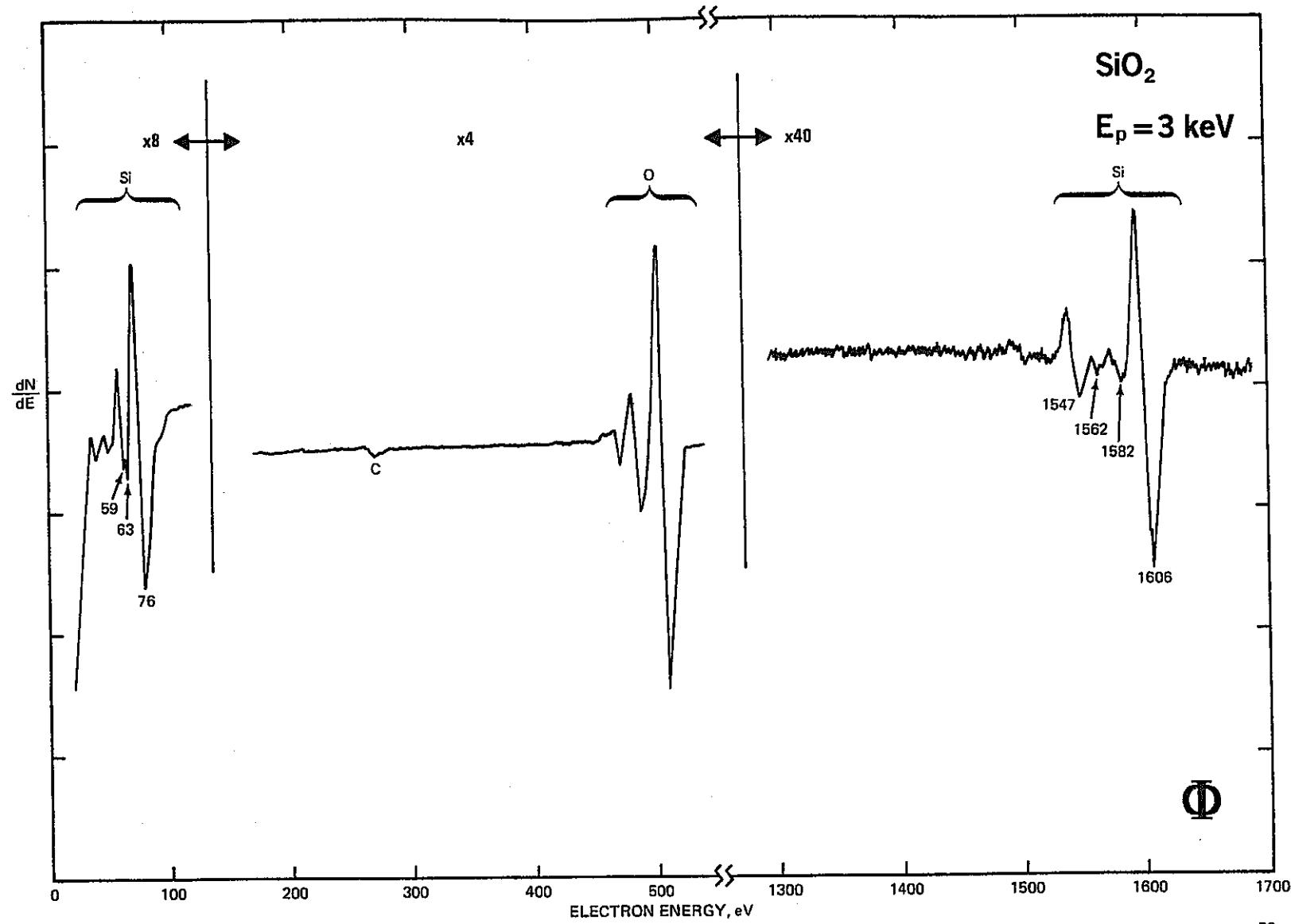
HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

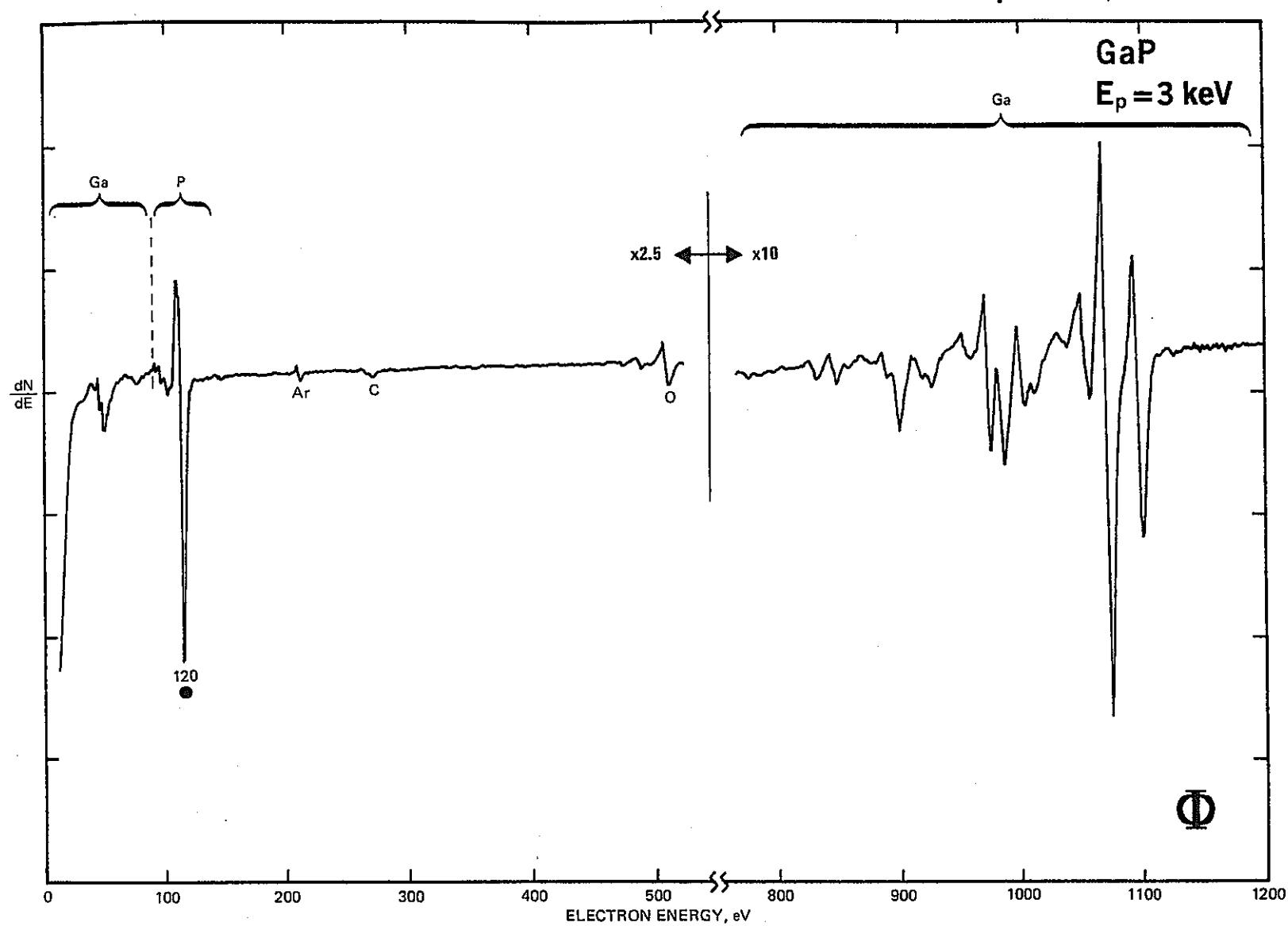
Aluminum, Al Atomic Number 13

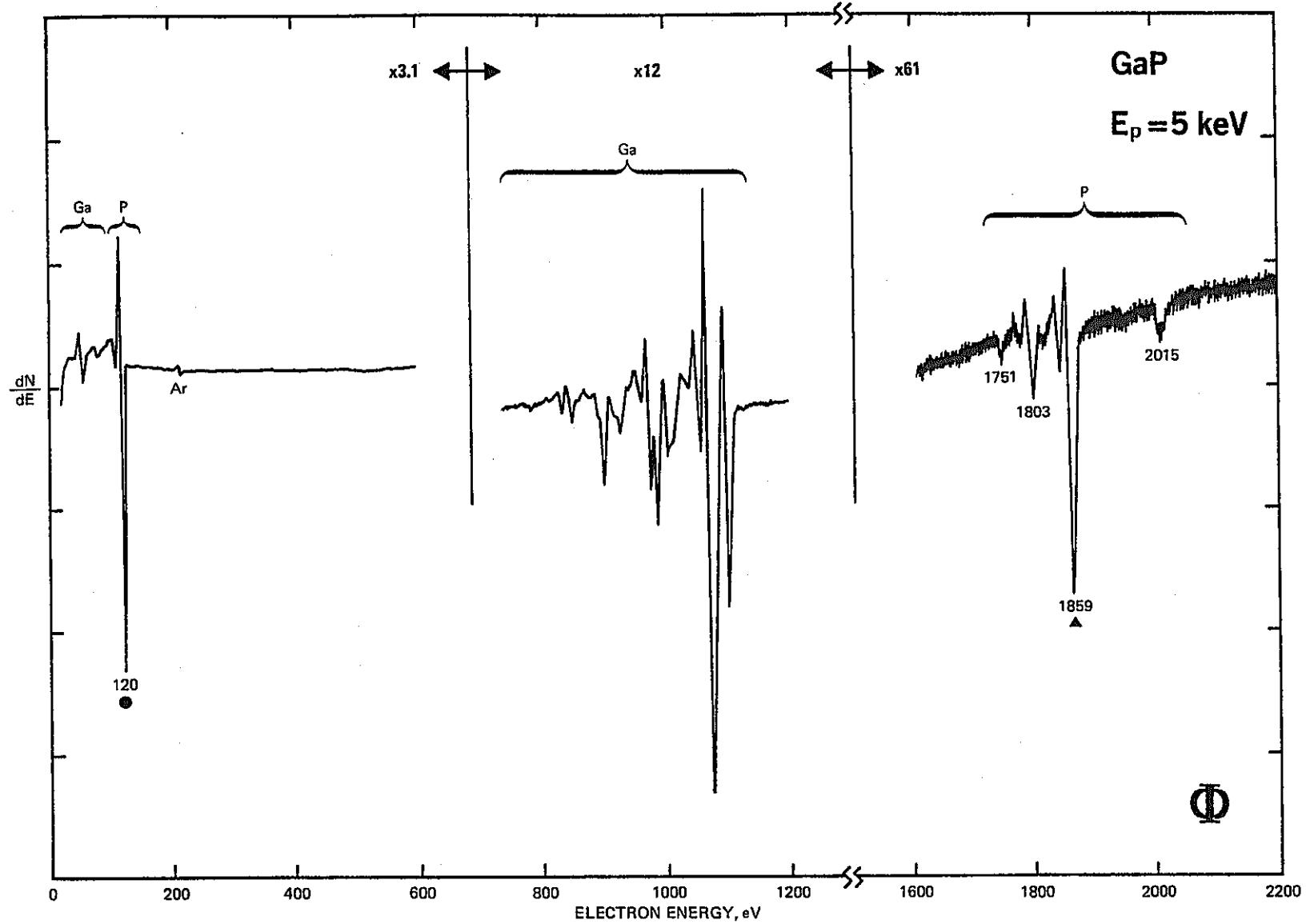


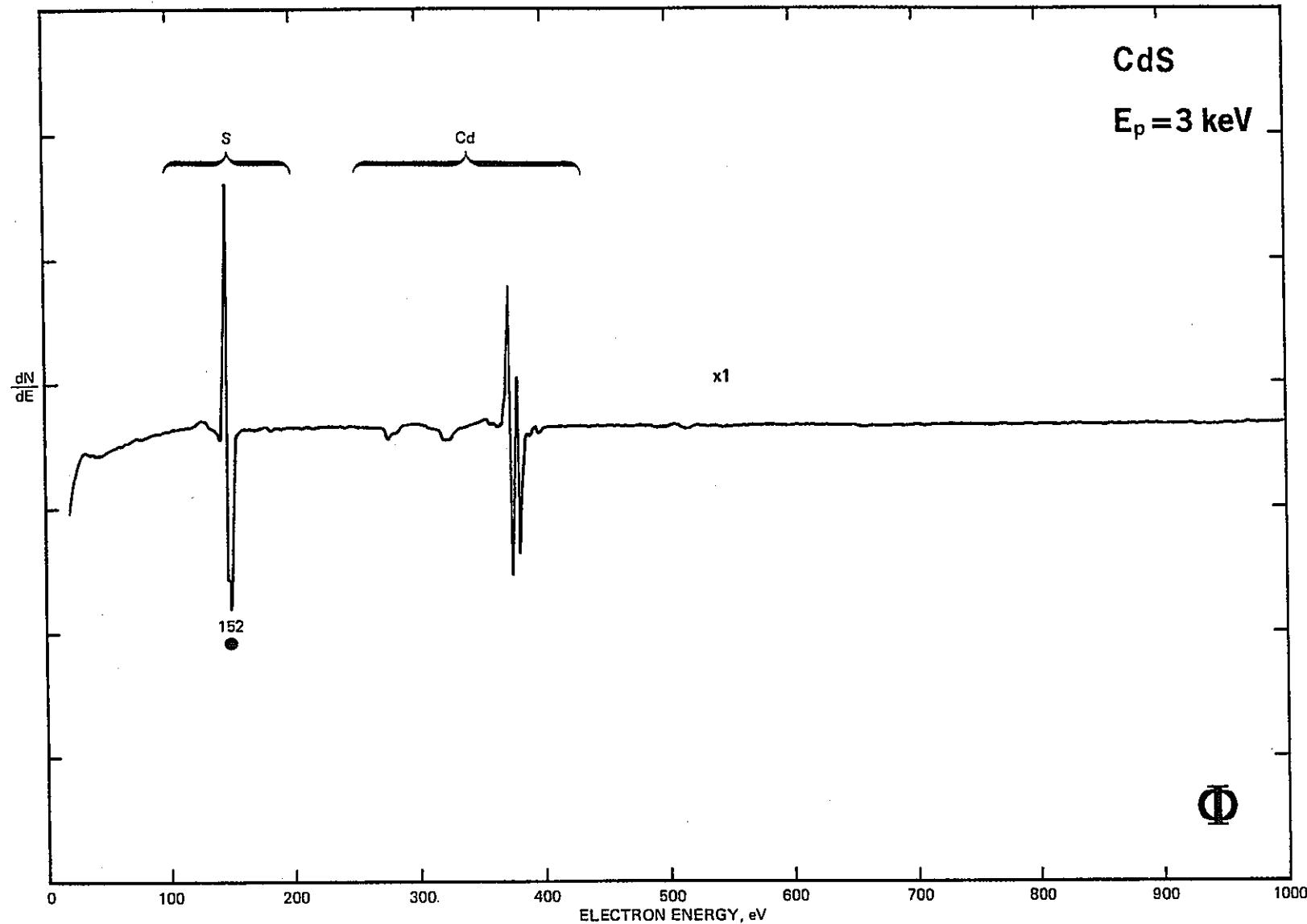
- 15 -

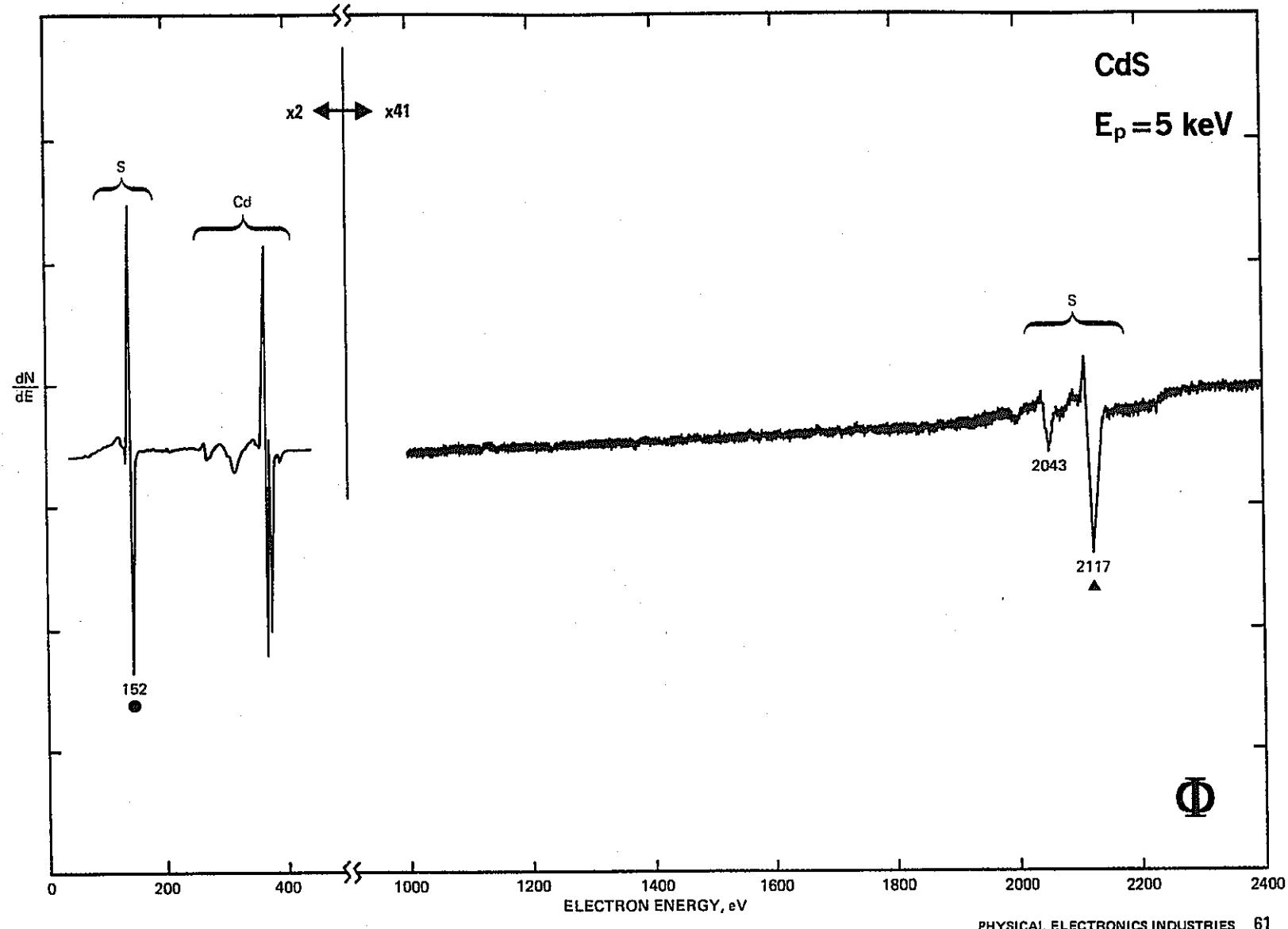


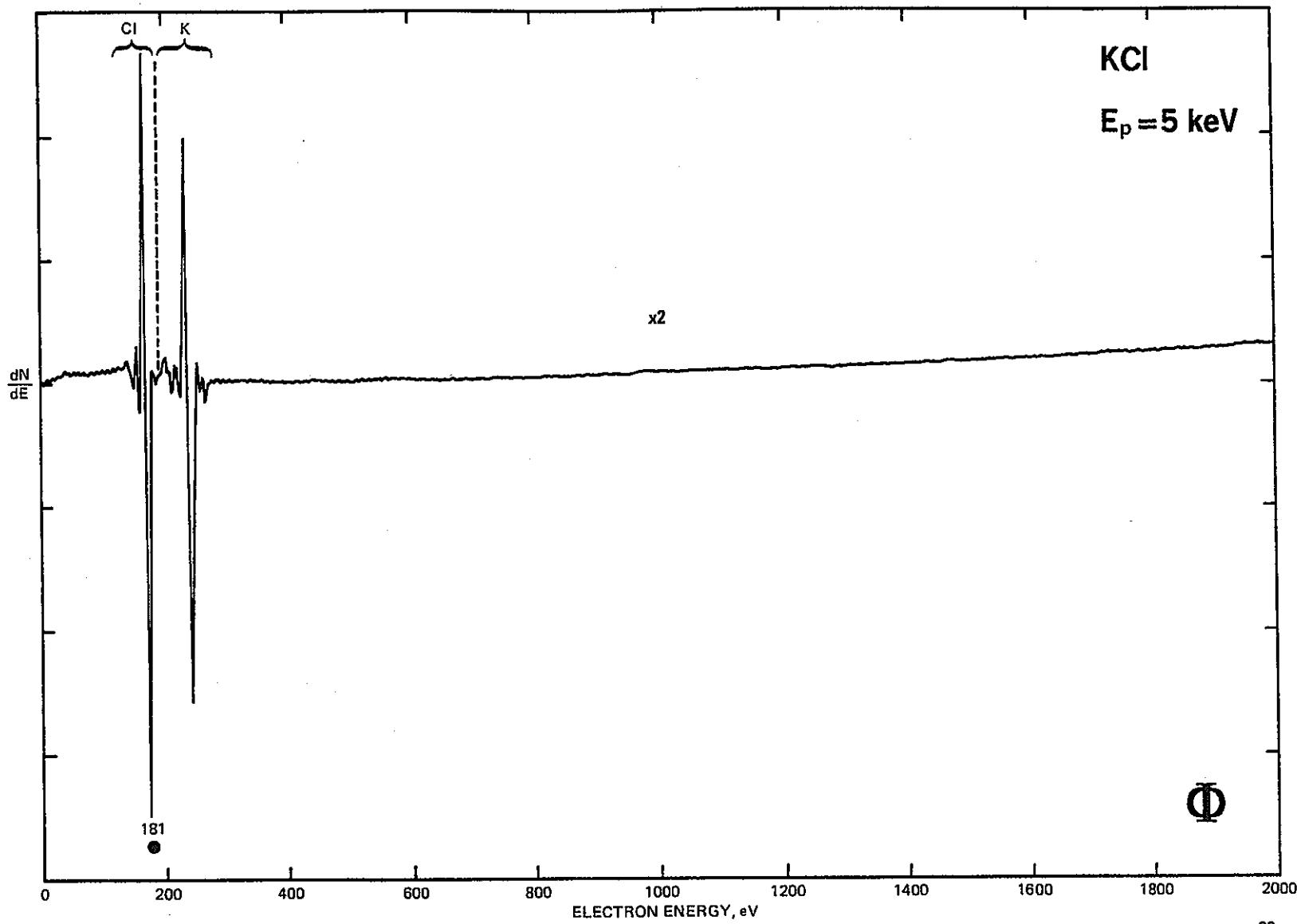


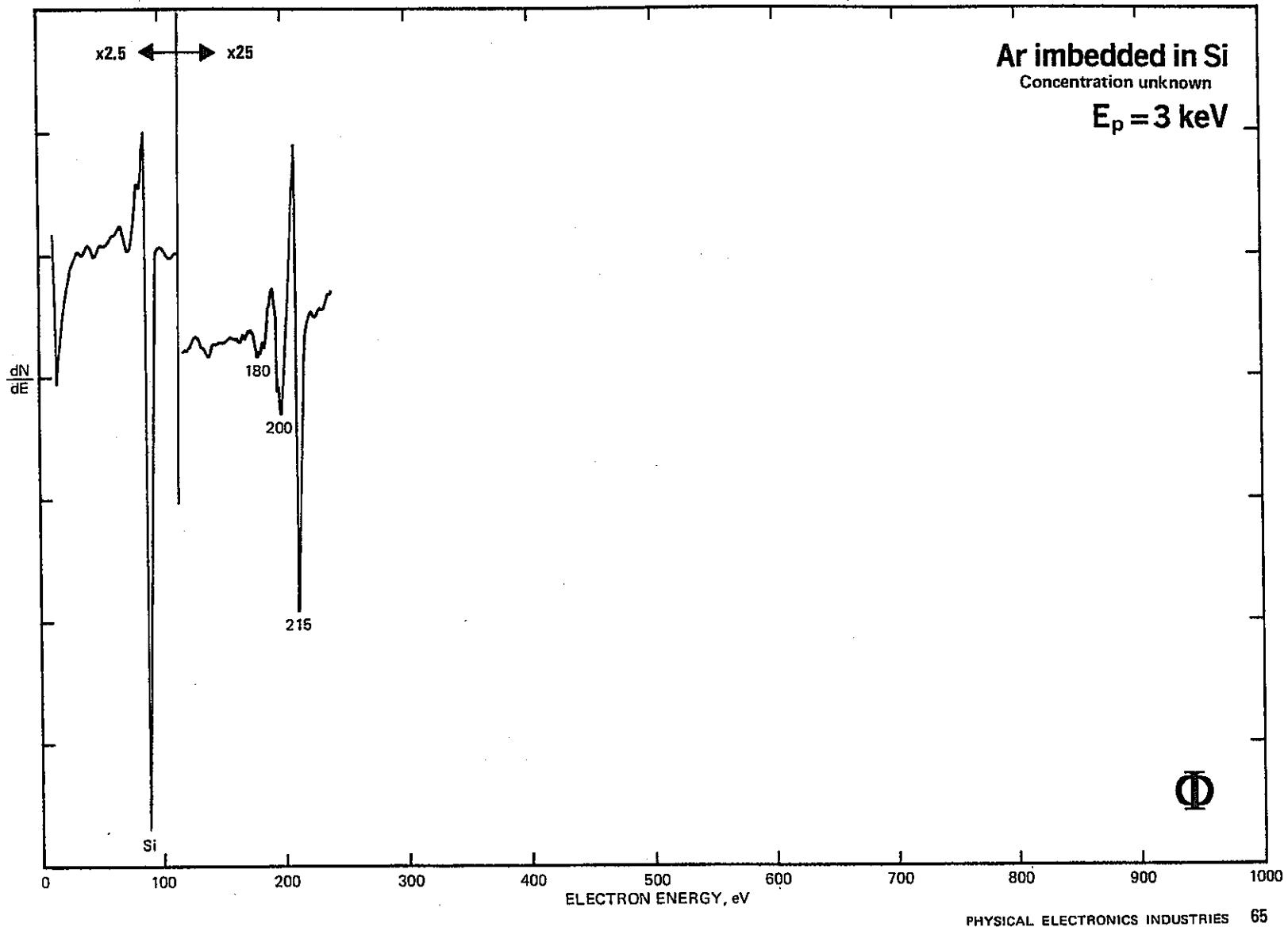


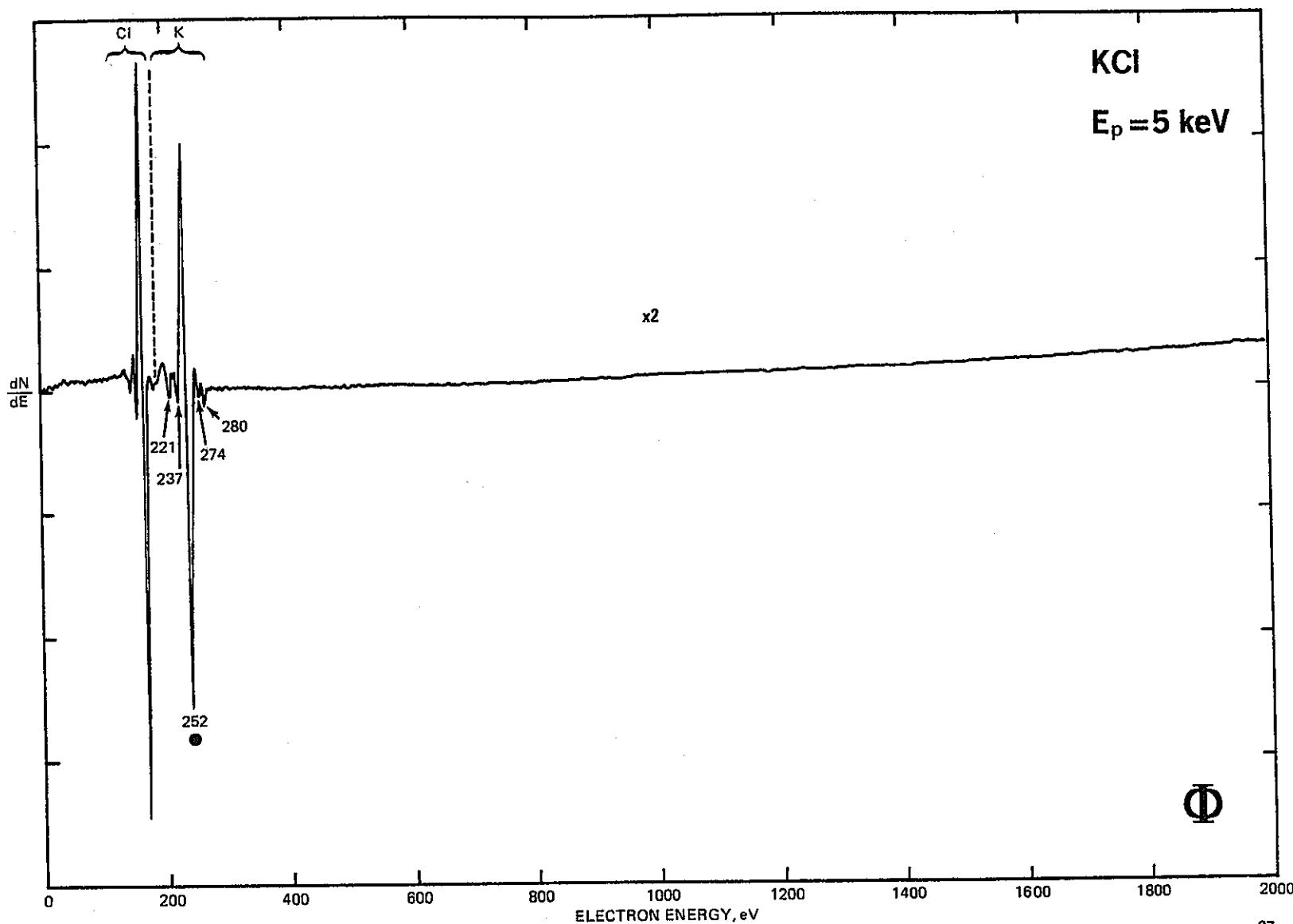


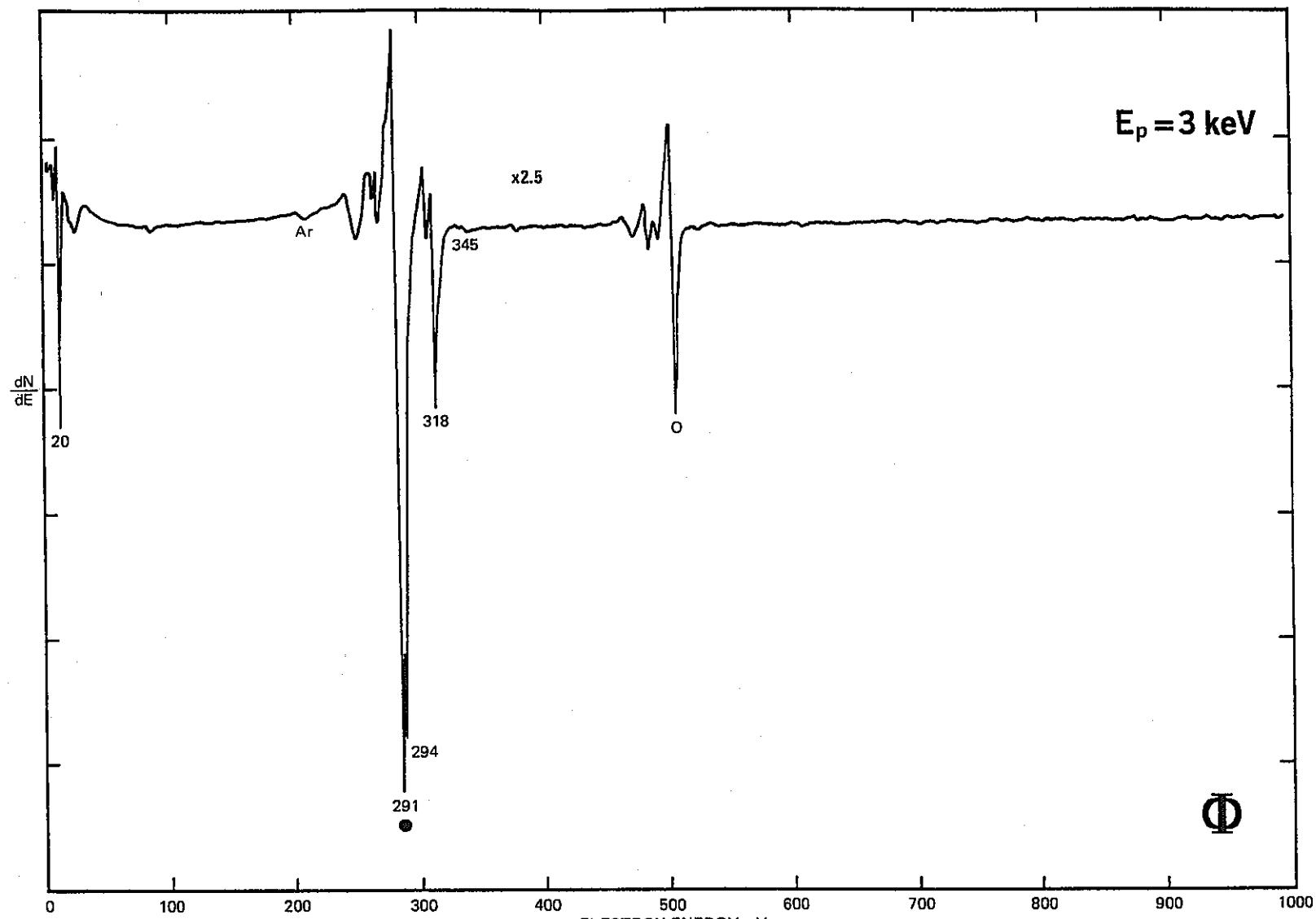


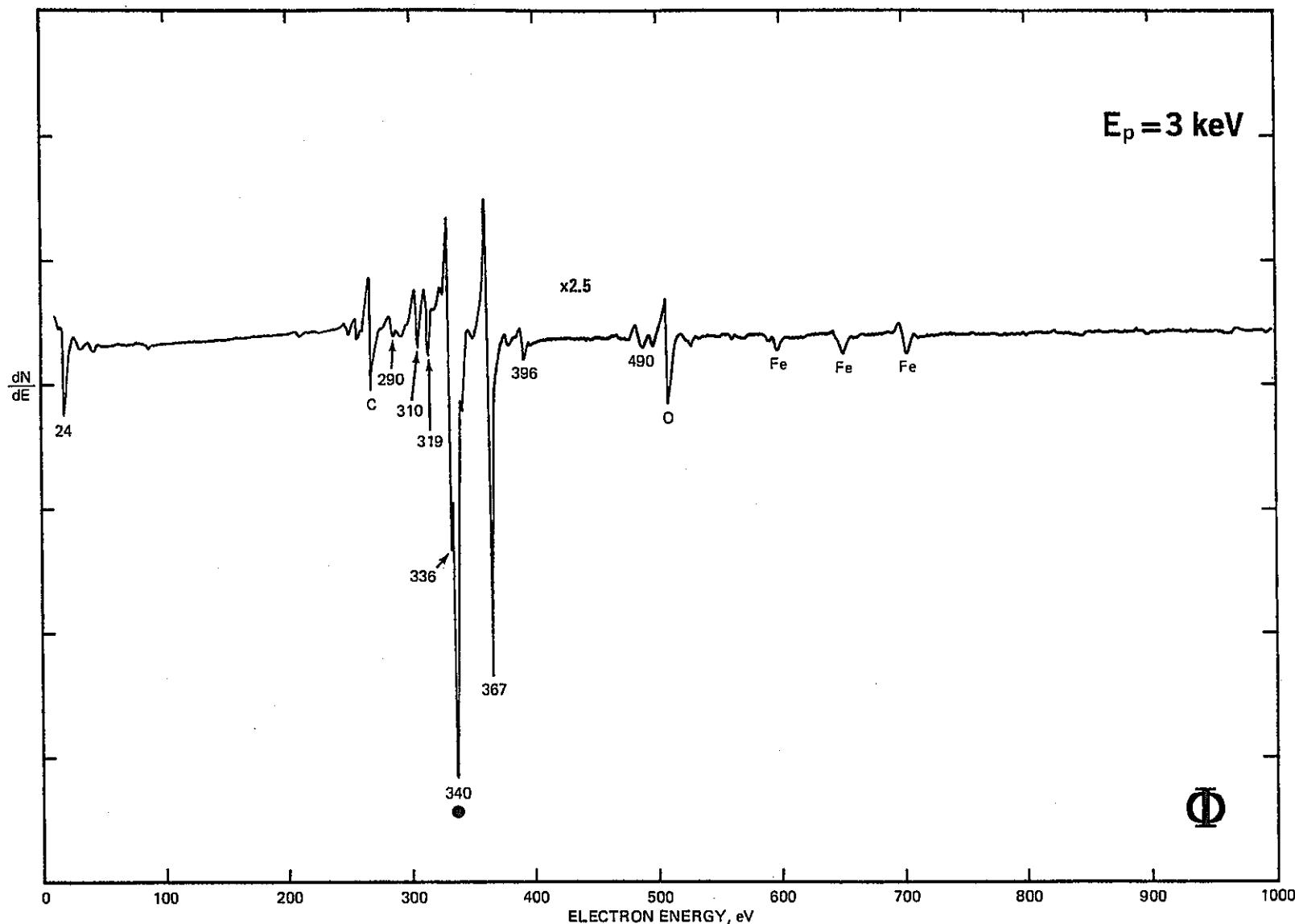


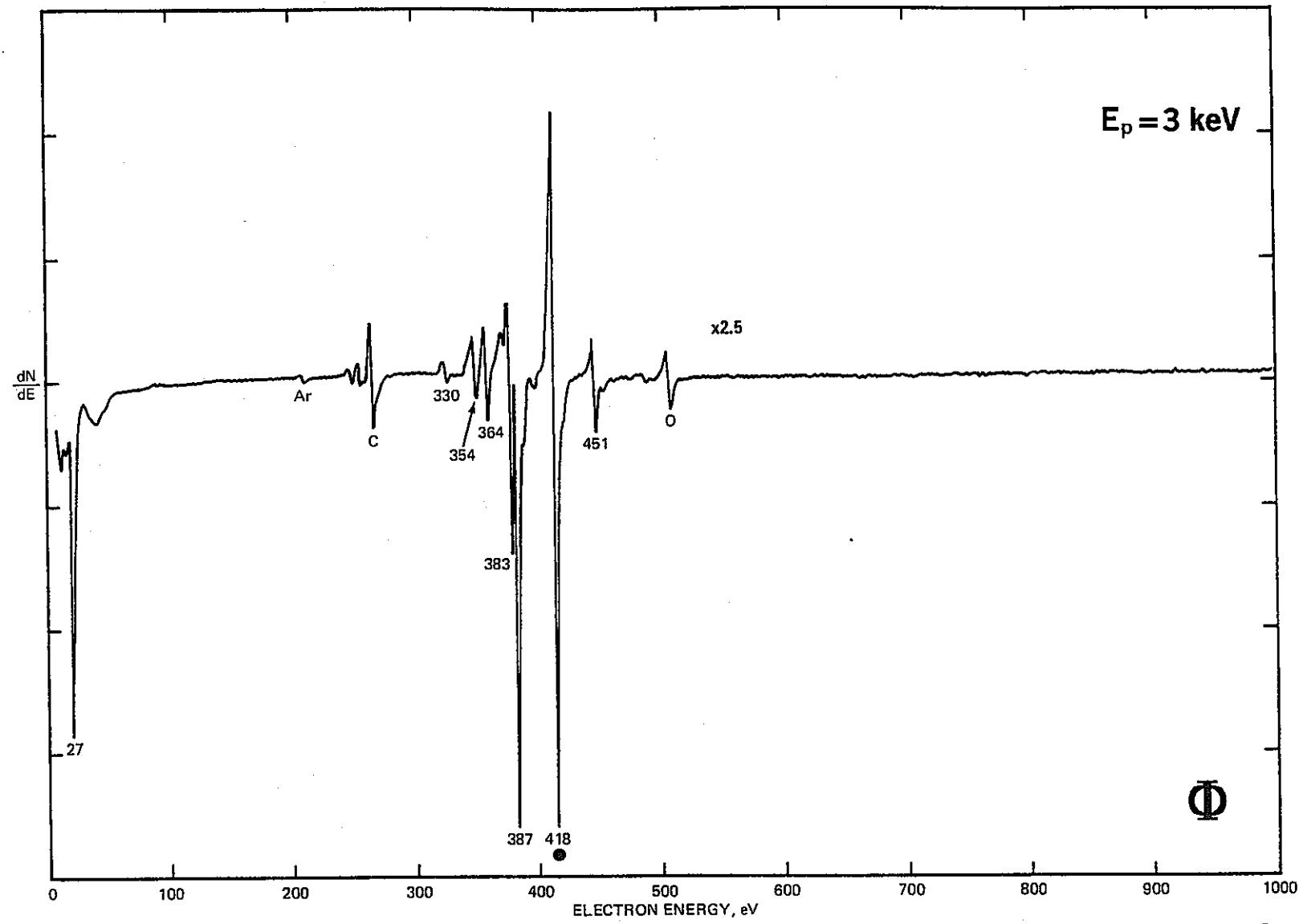


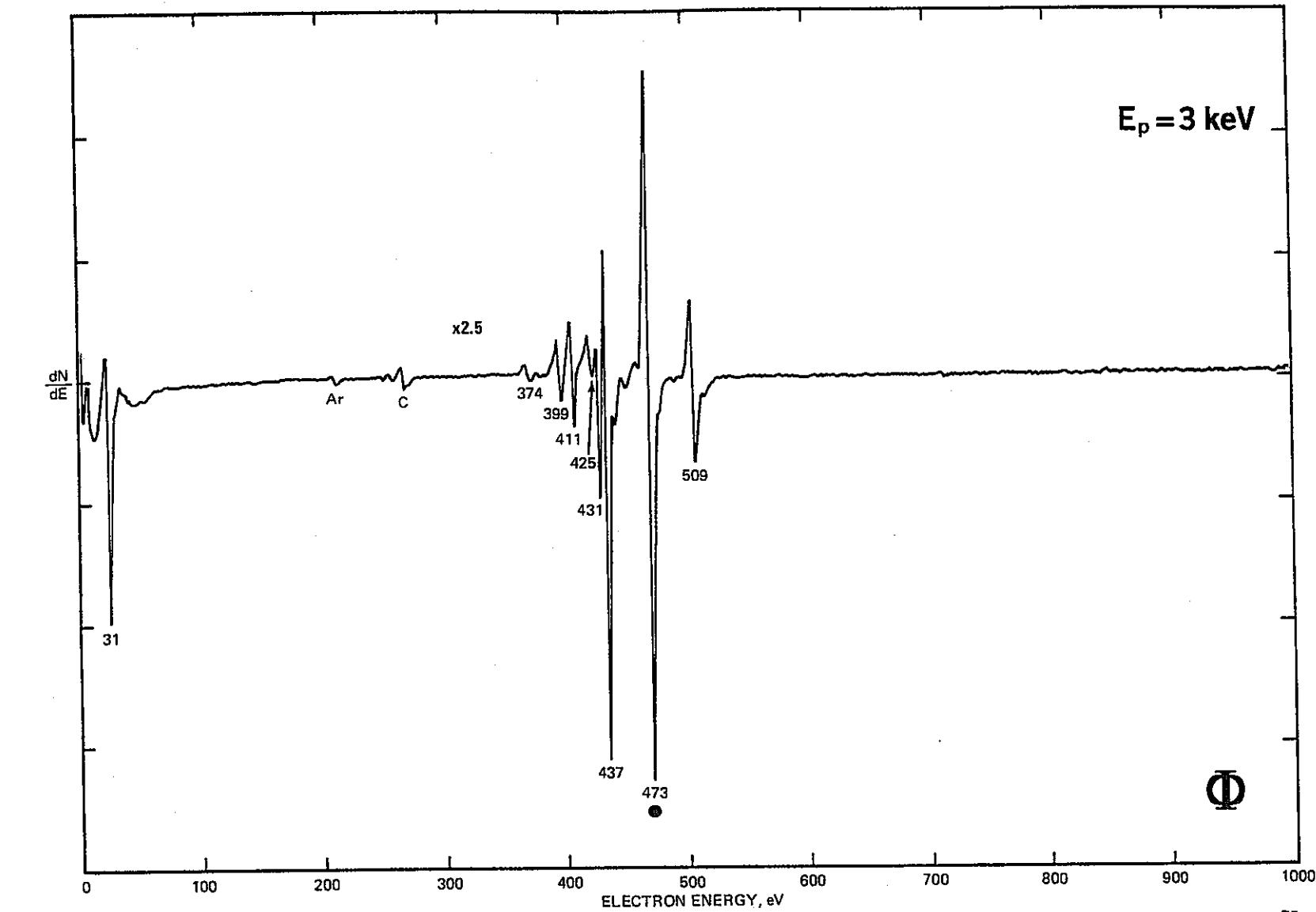




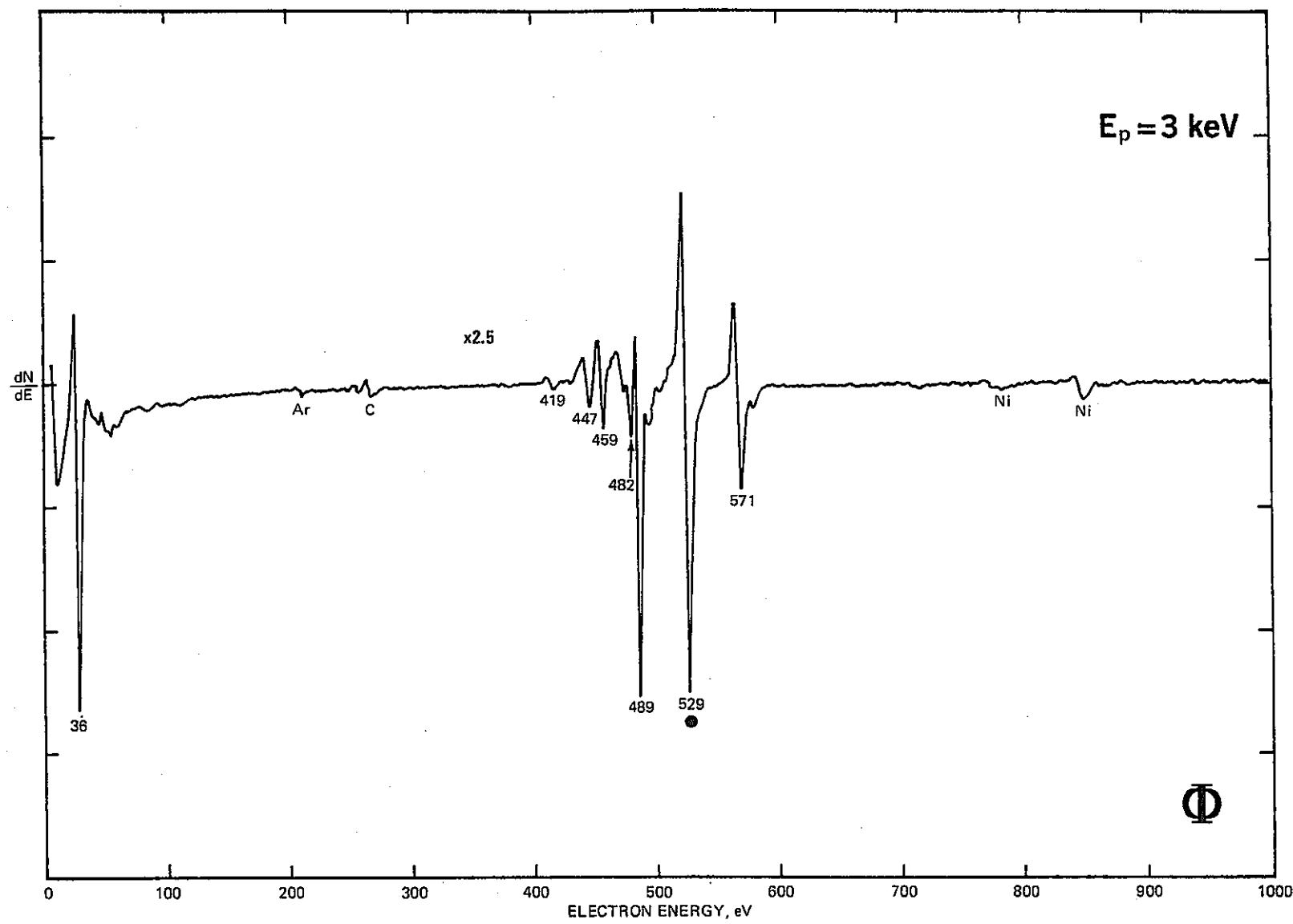


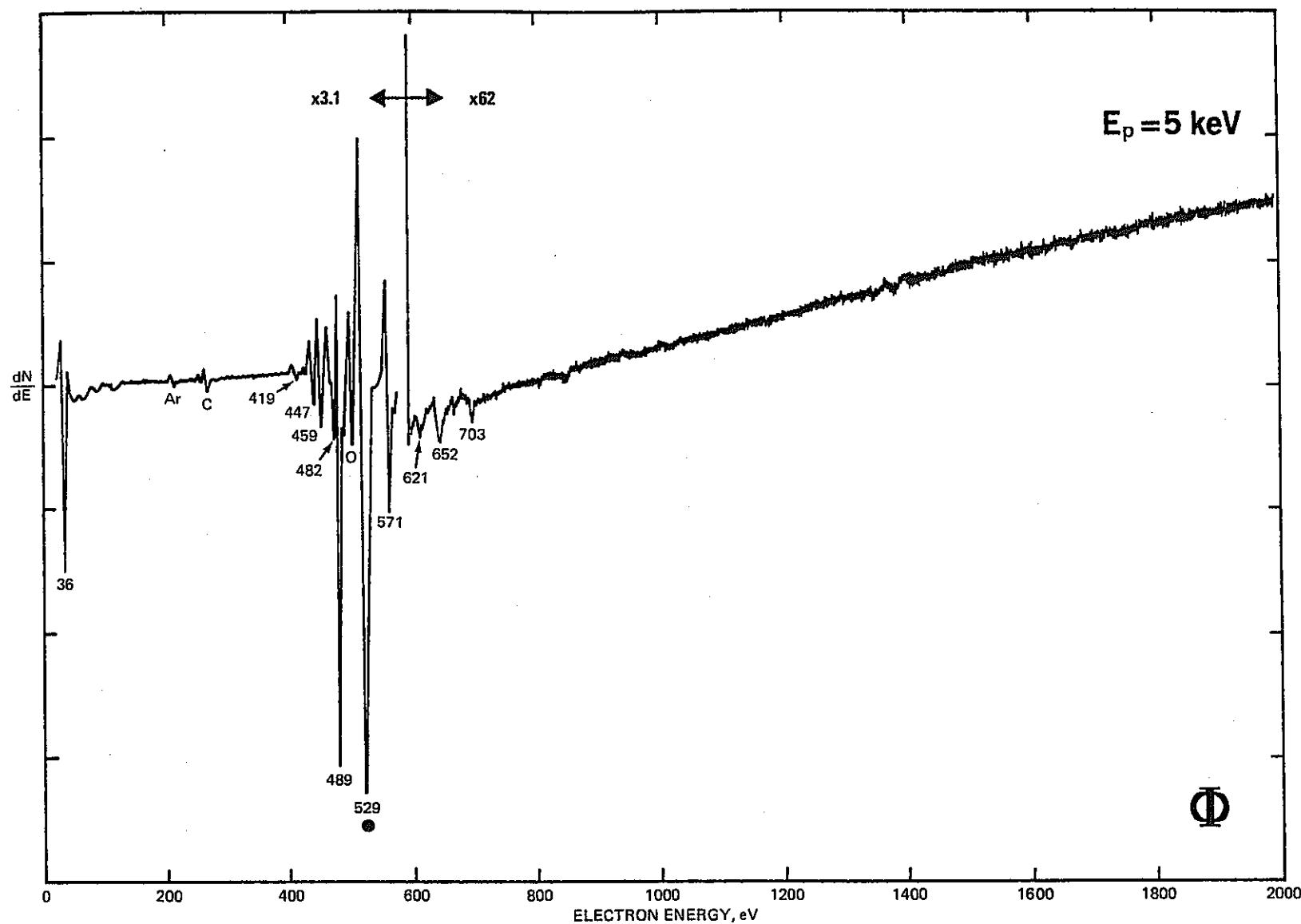


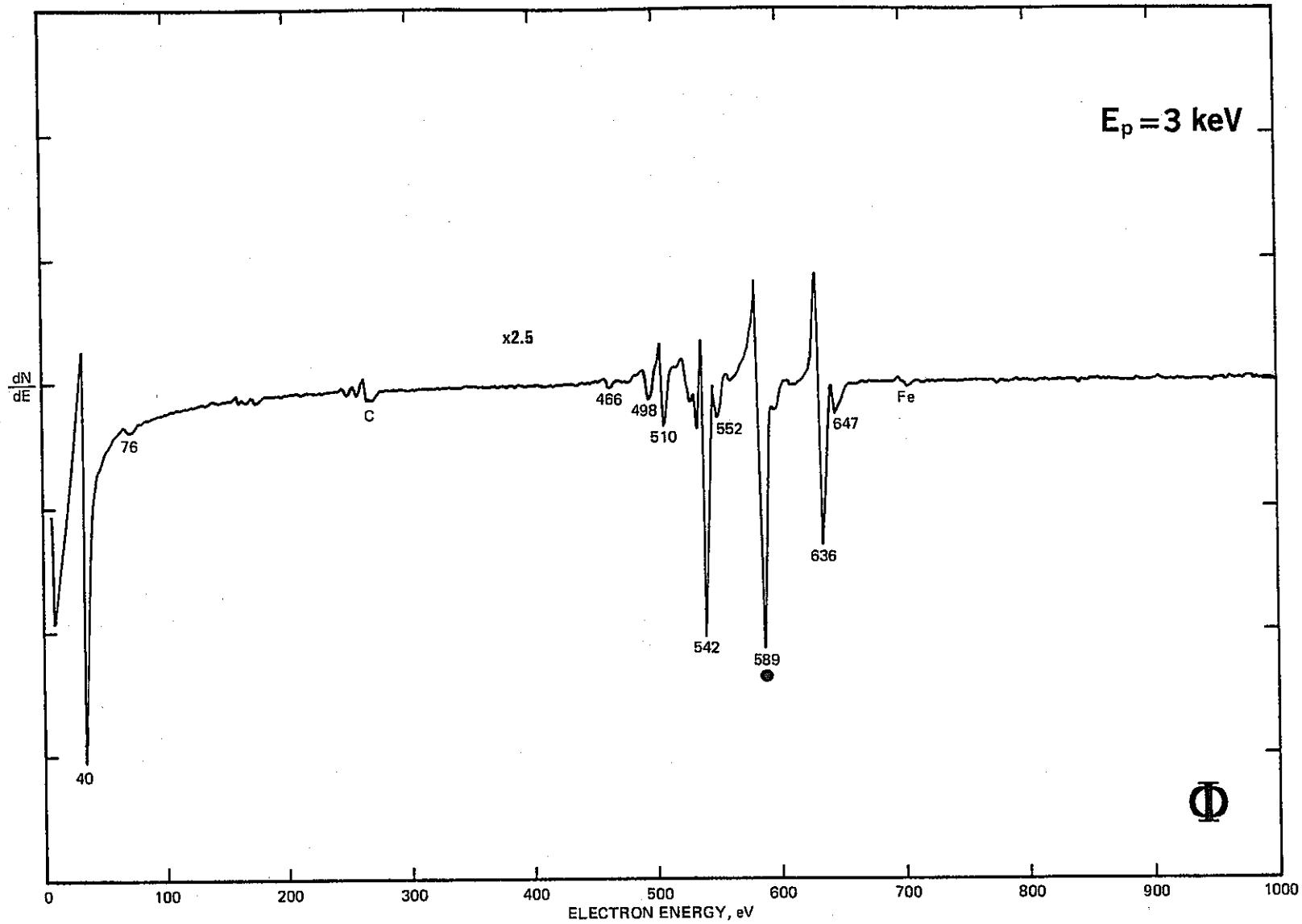


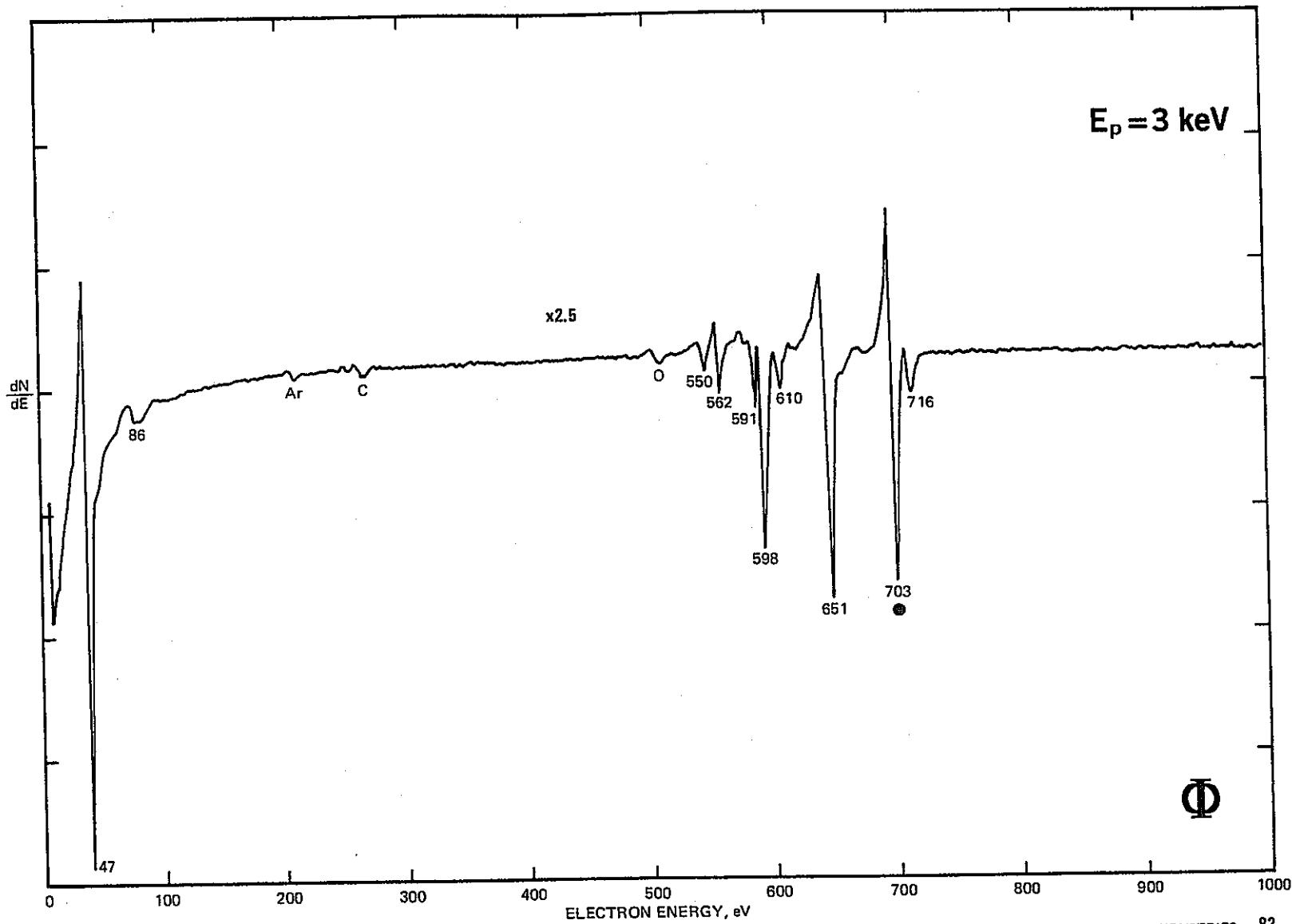


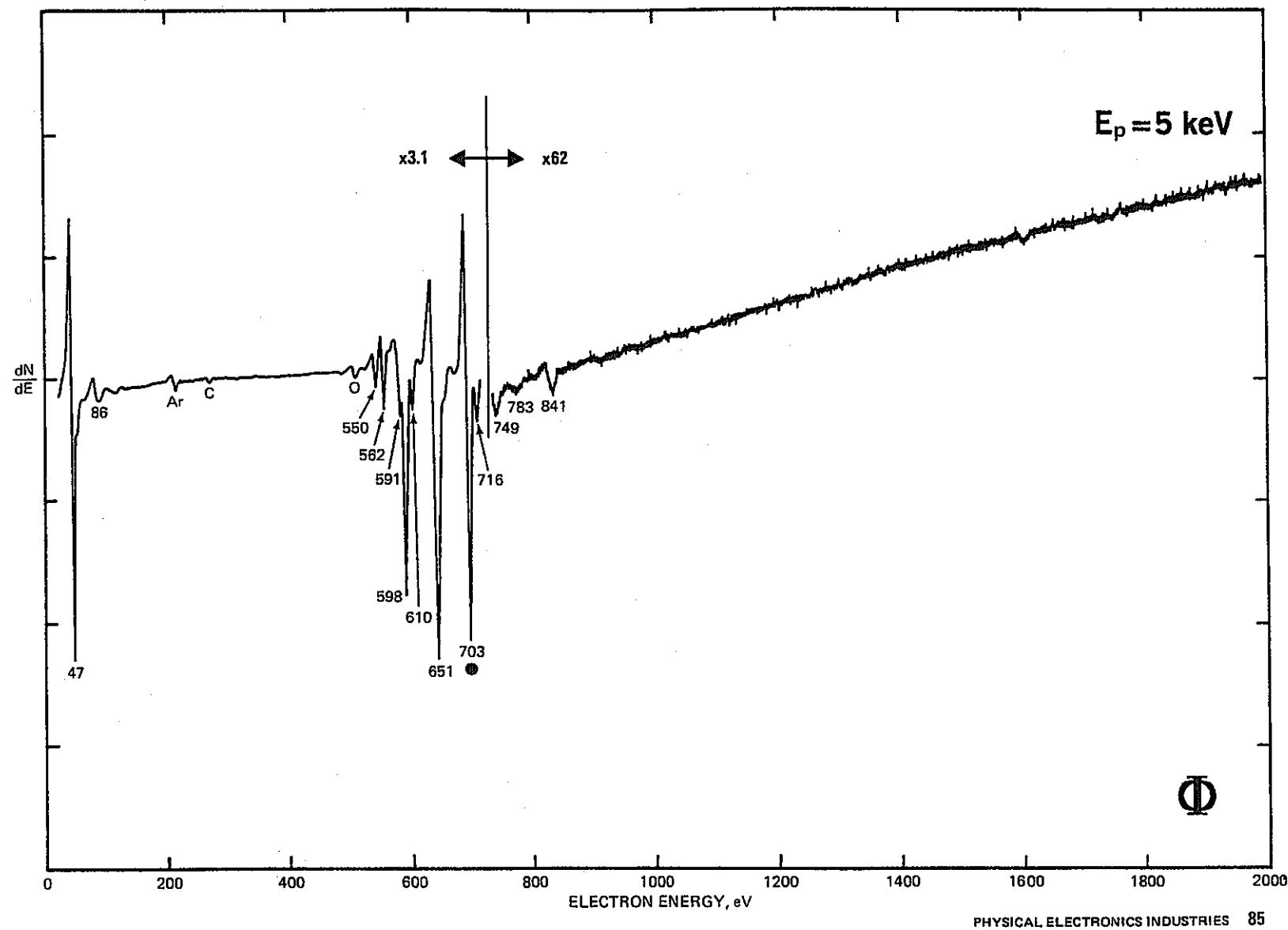
- 70 -

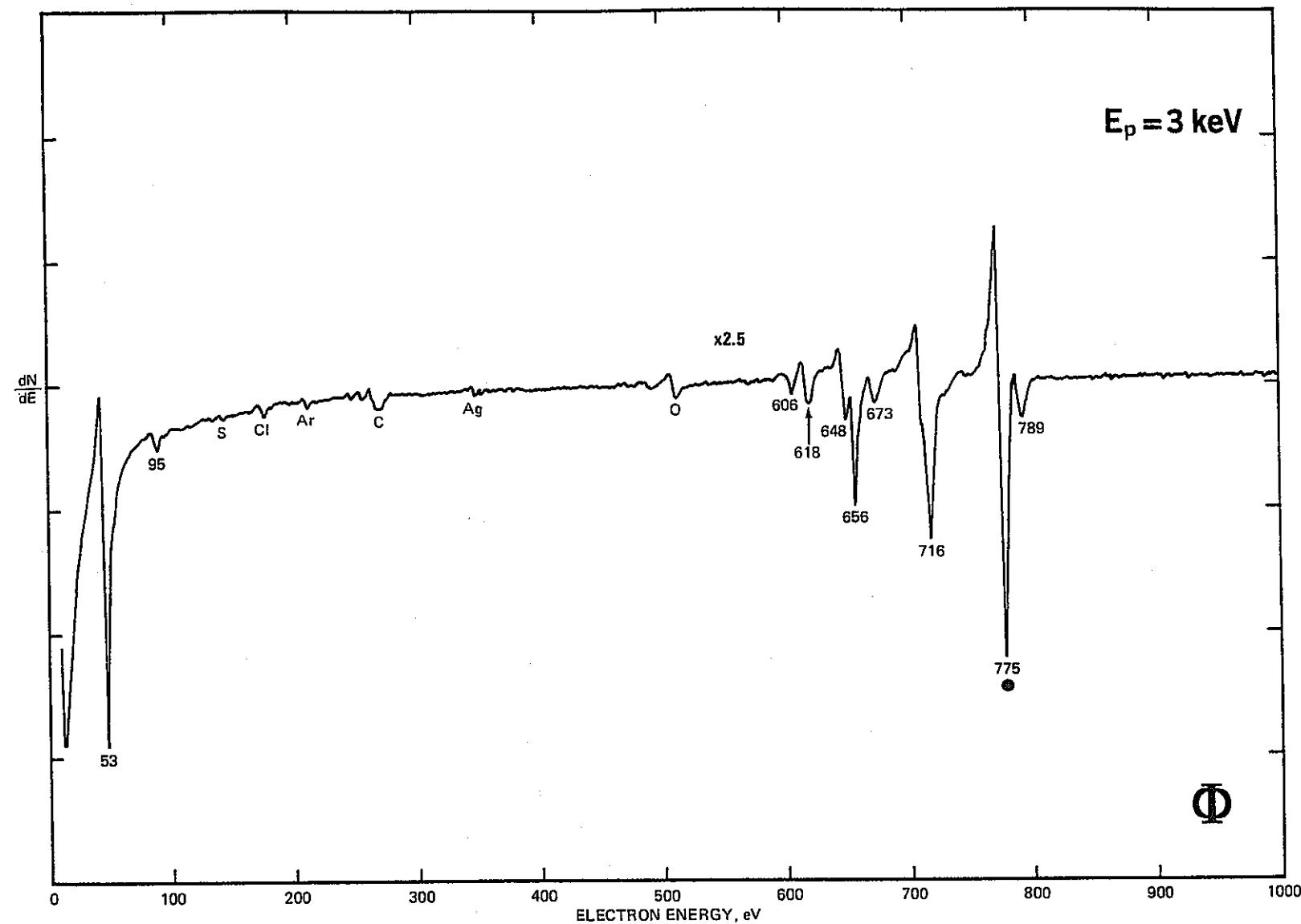


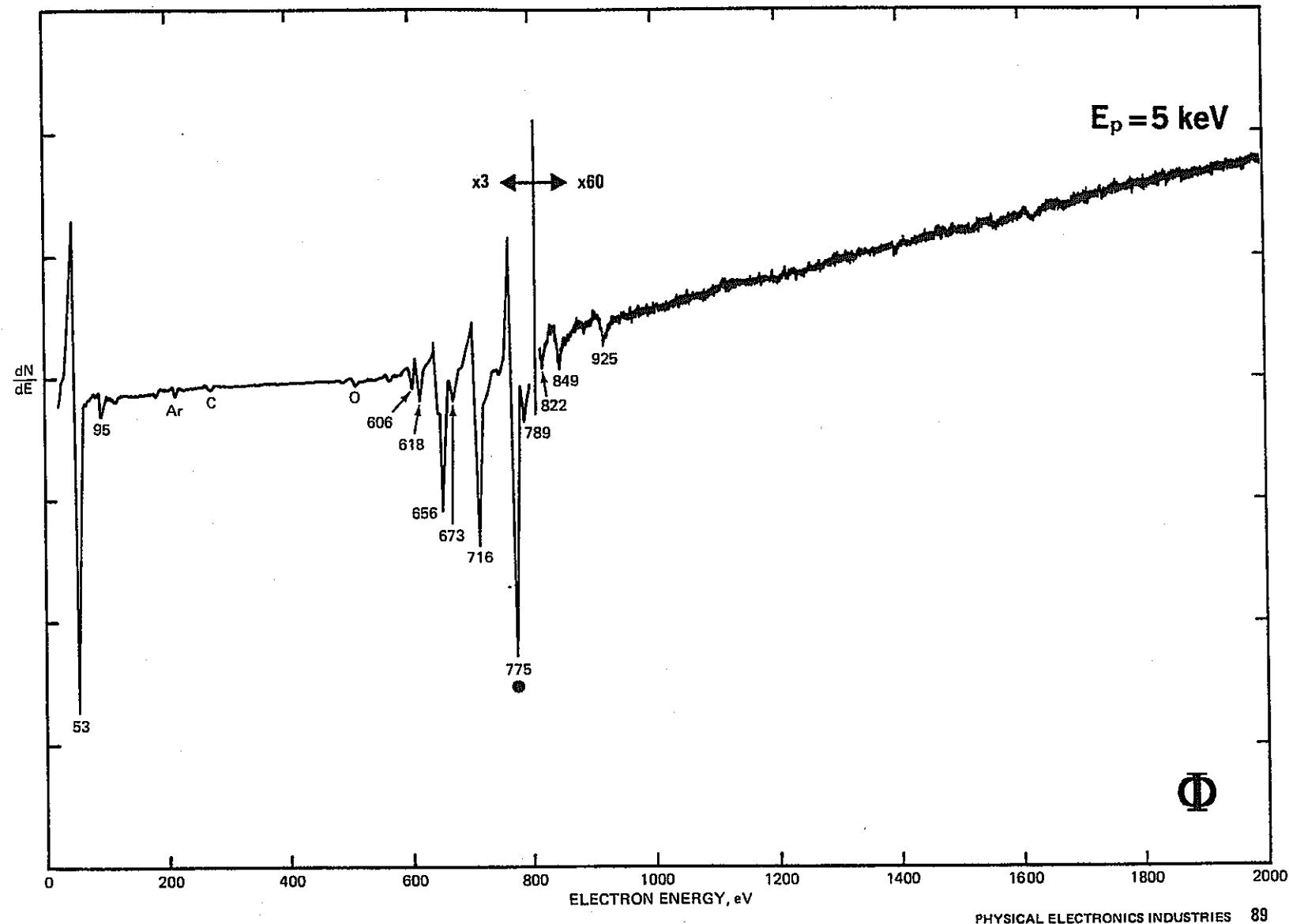


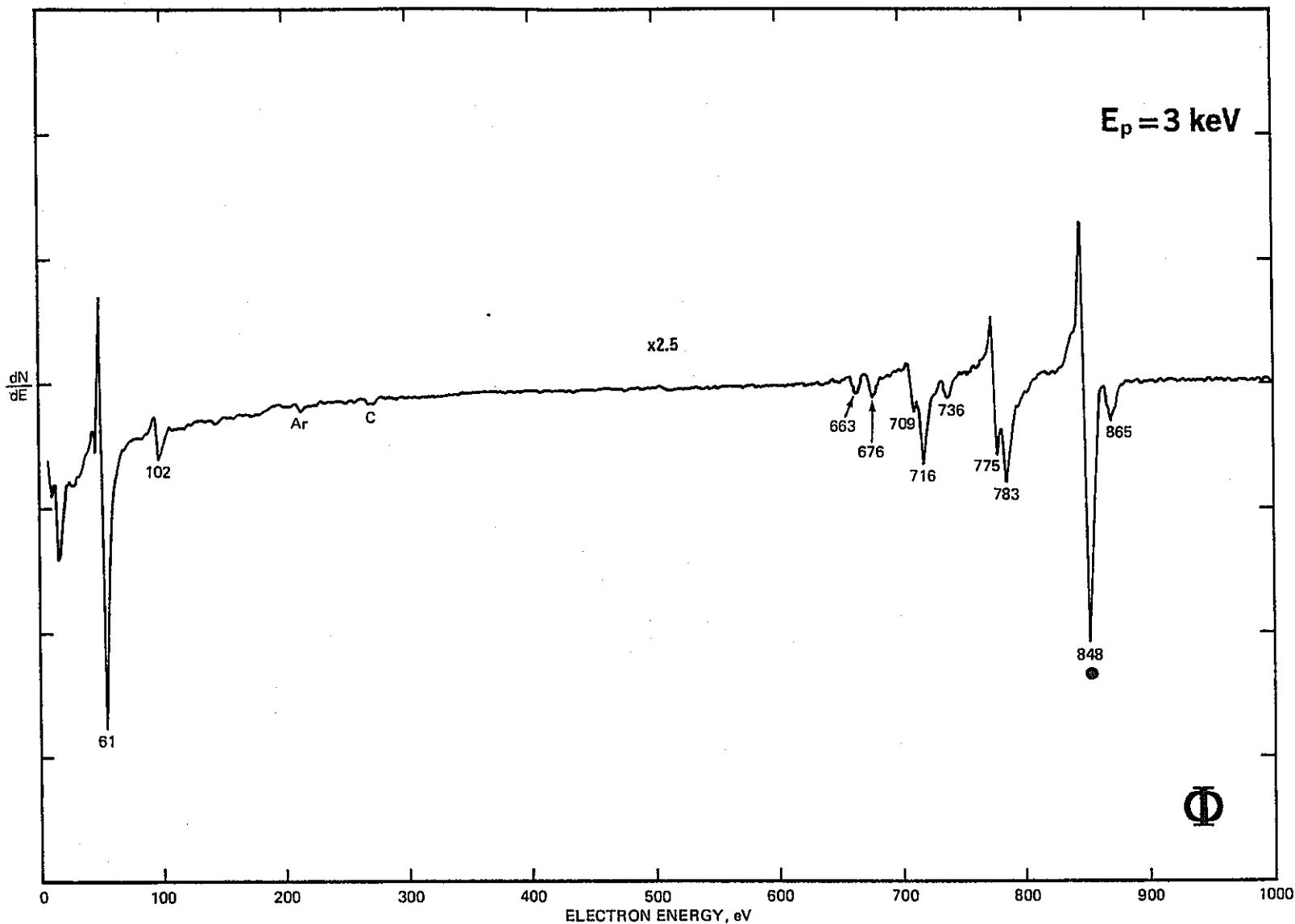


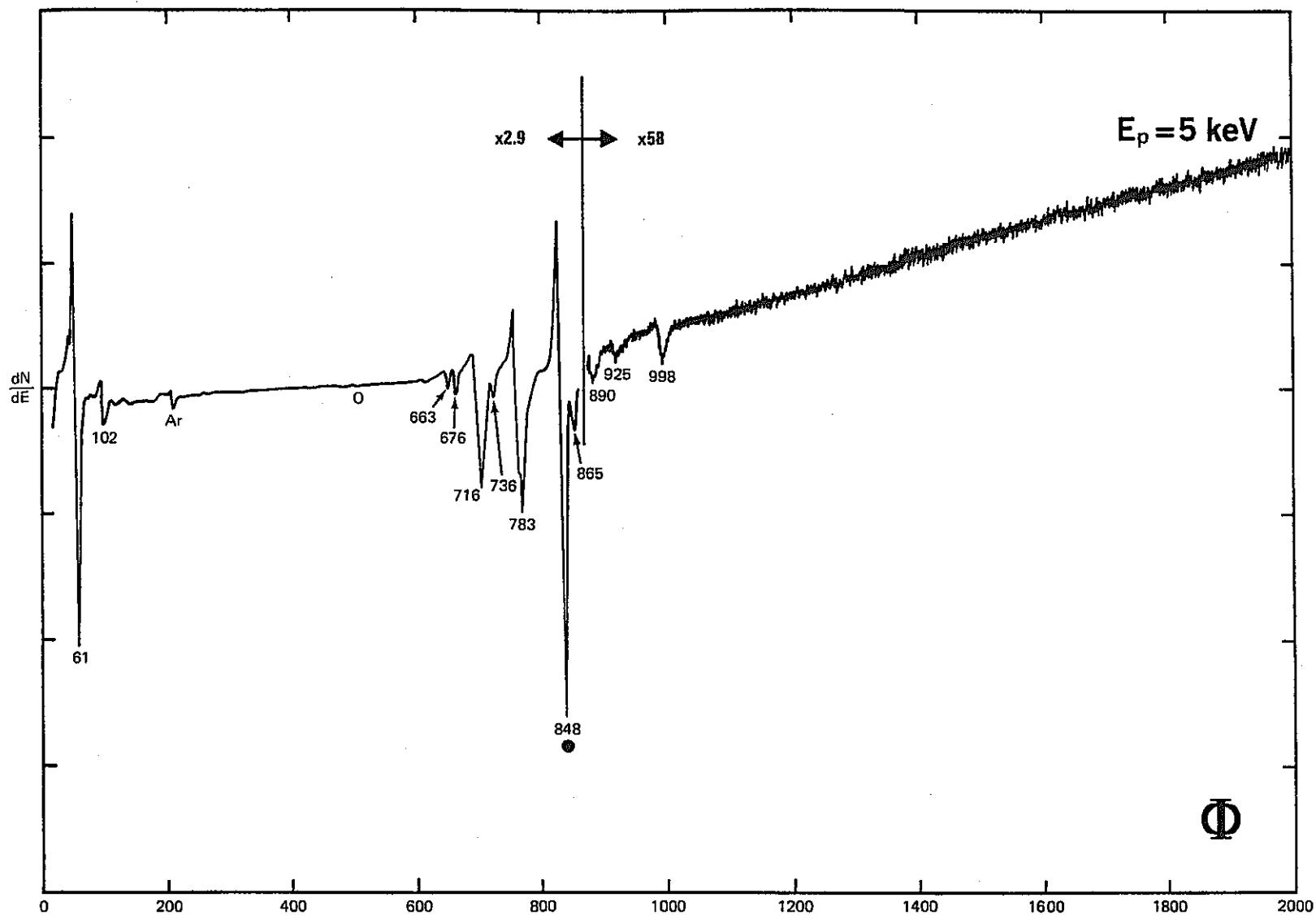


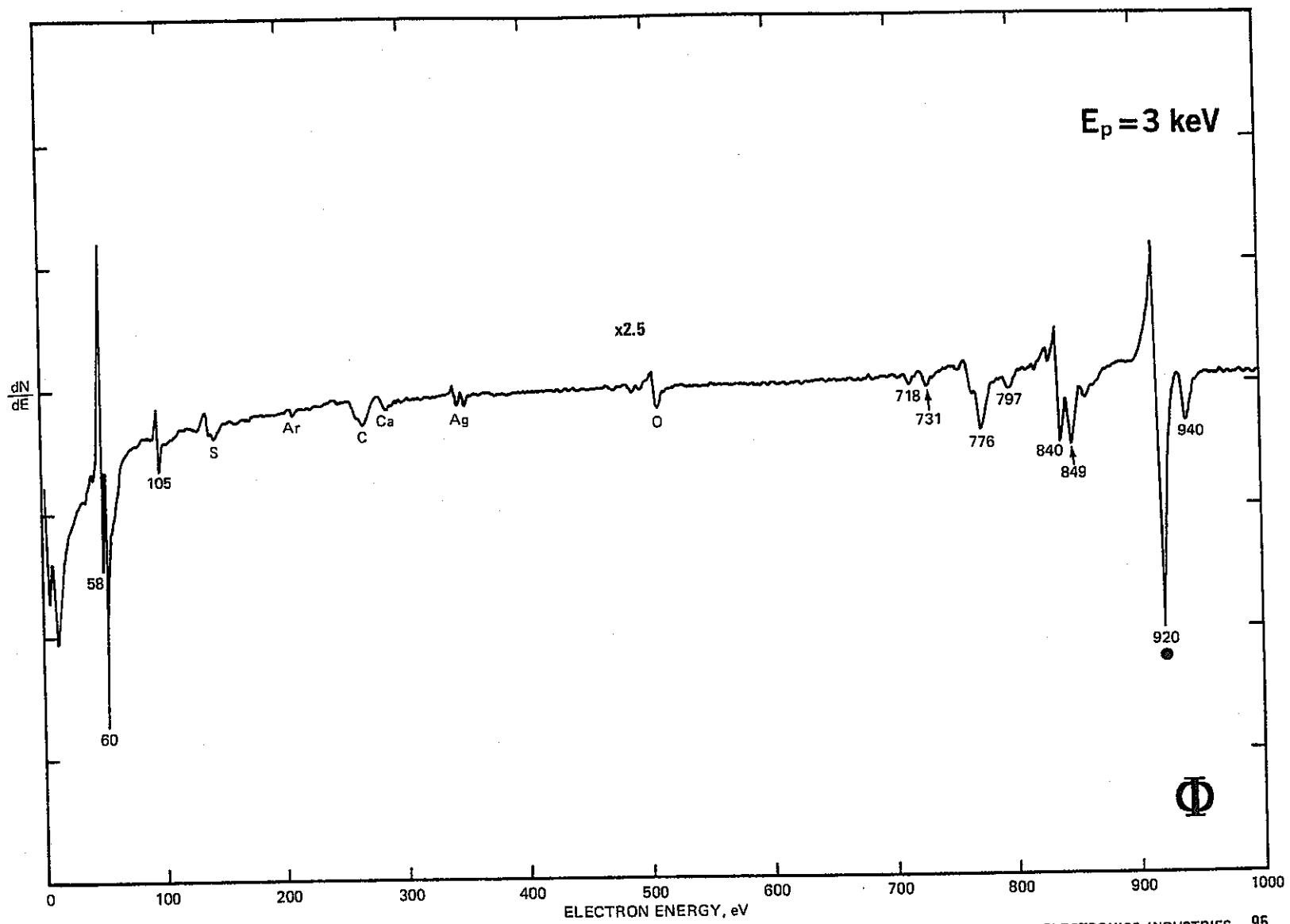




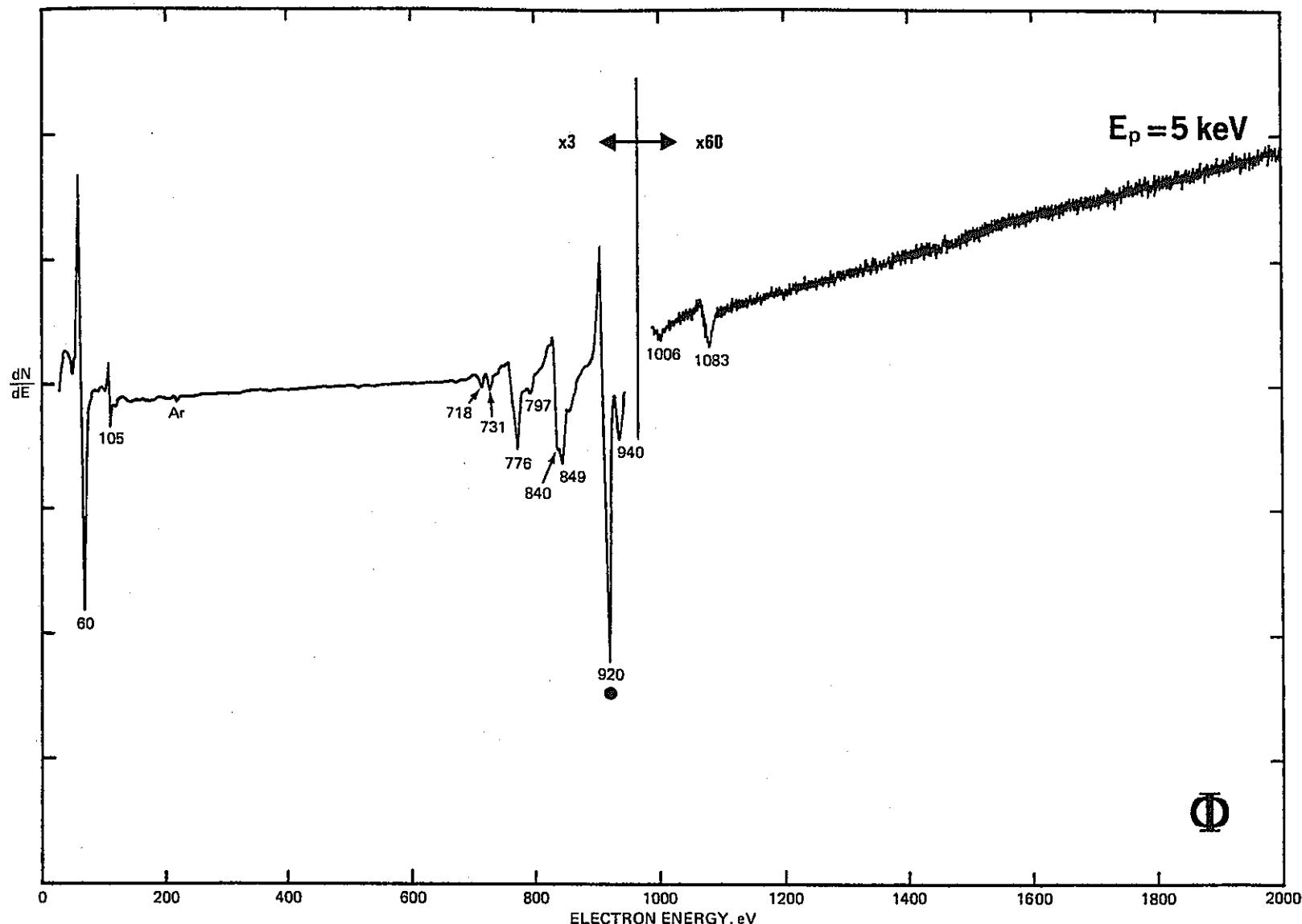


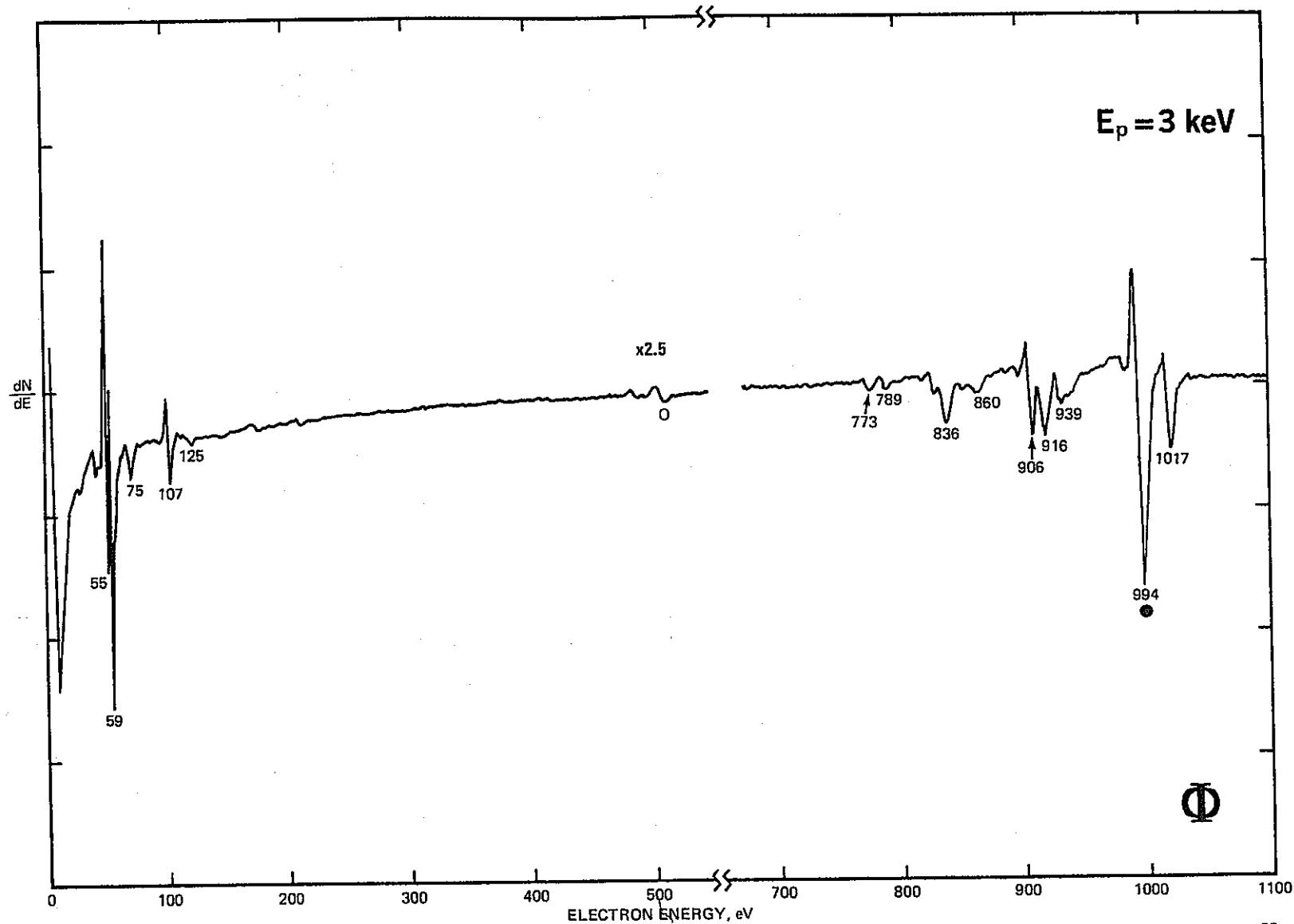


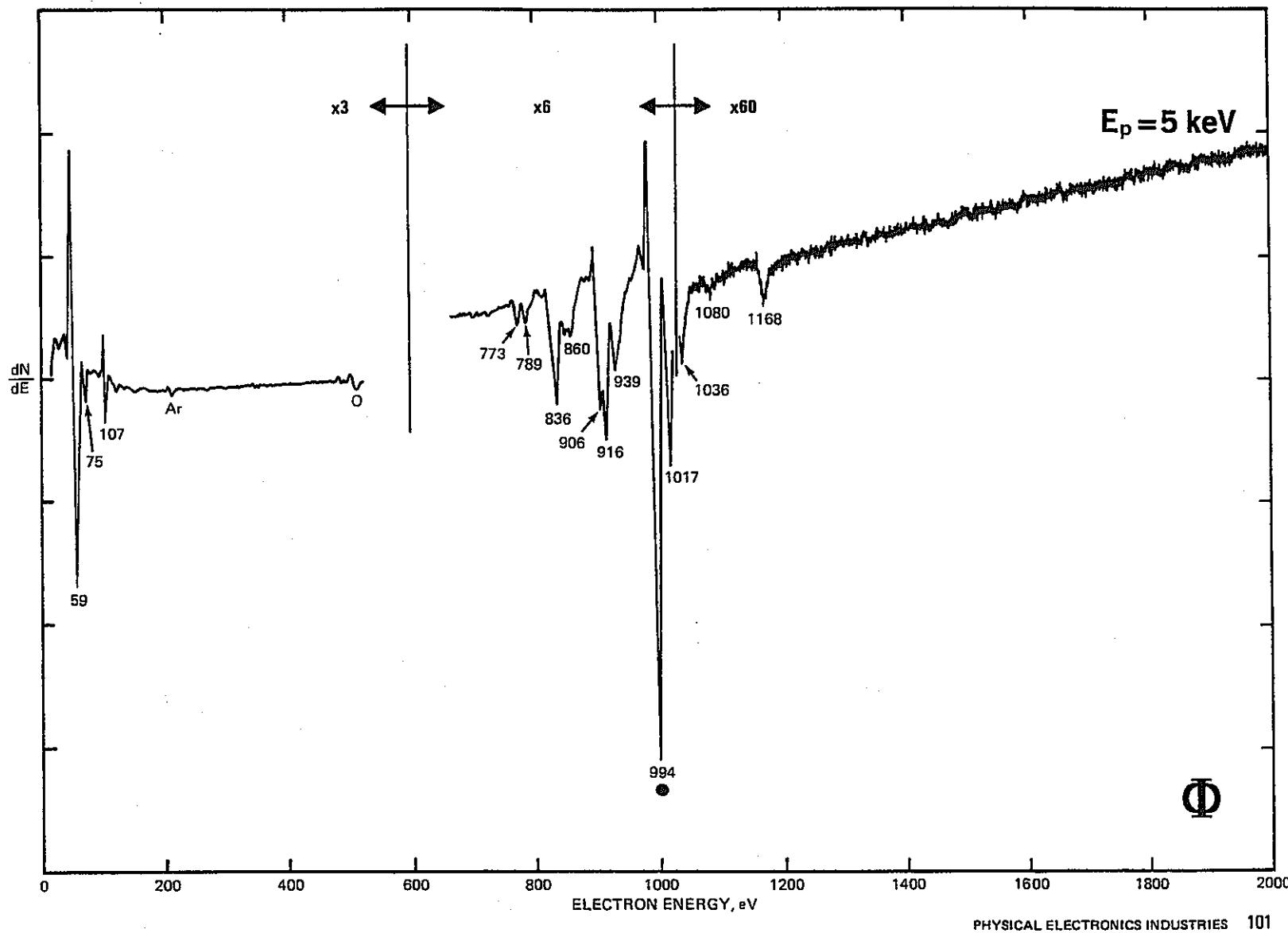


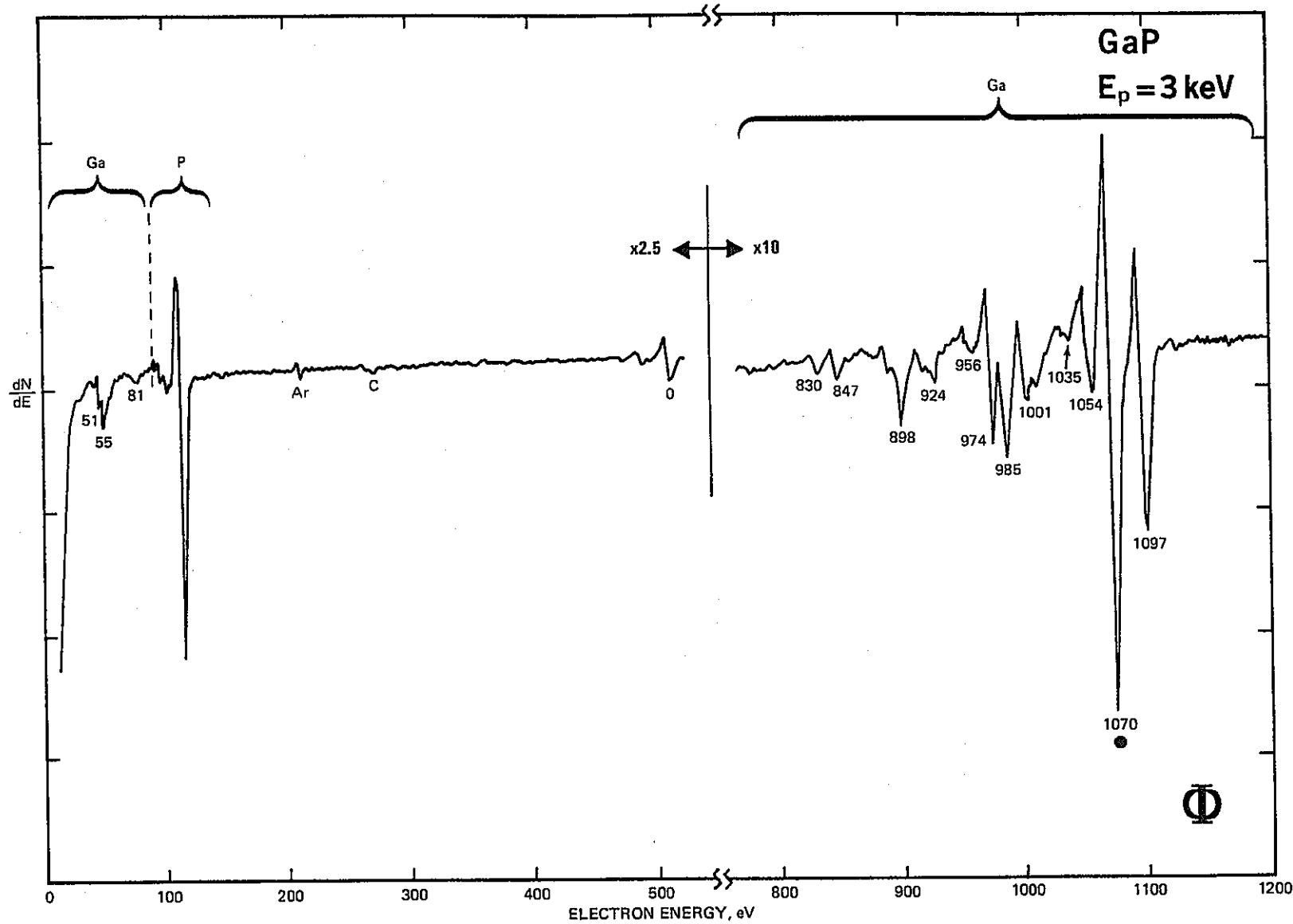


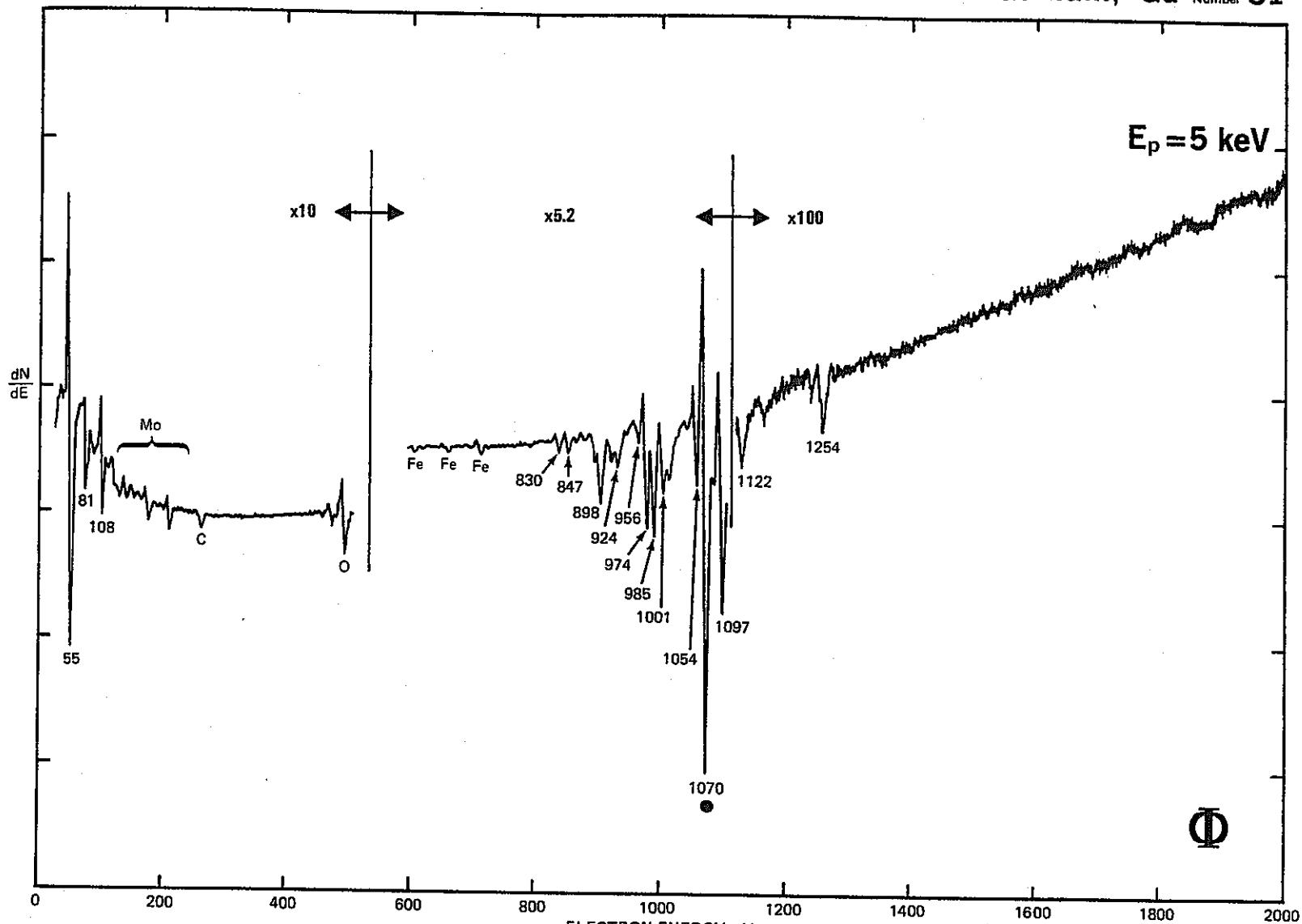
- 8 -

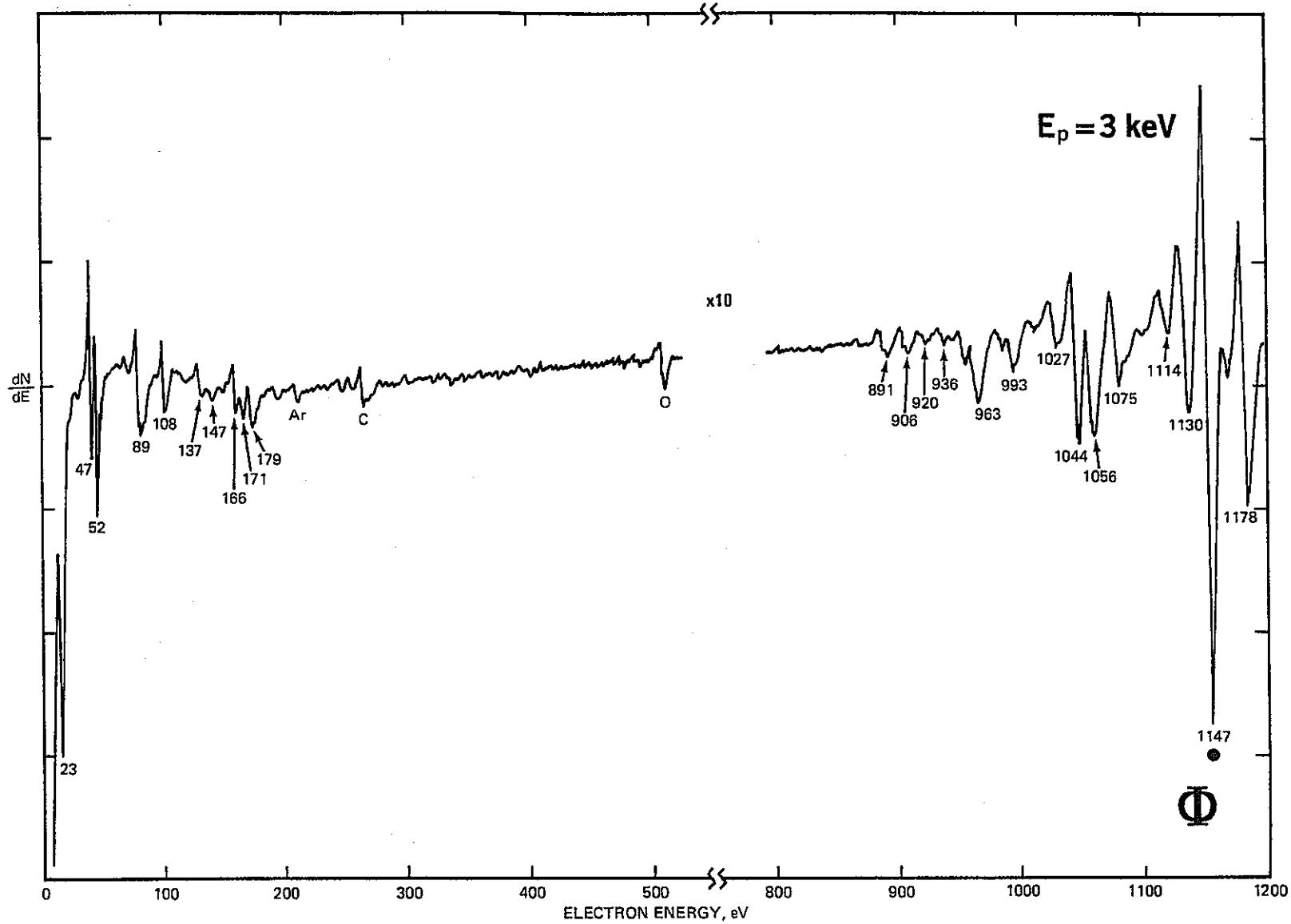


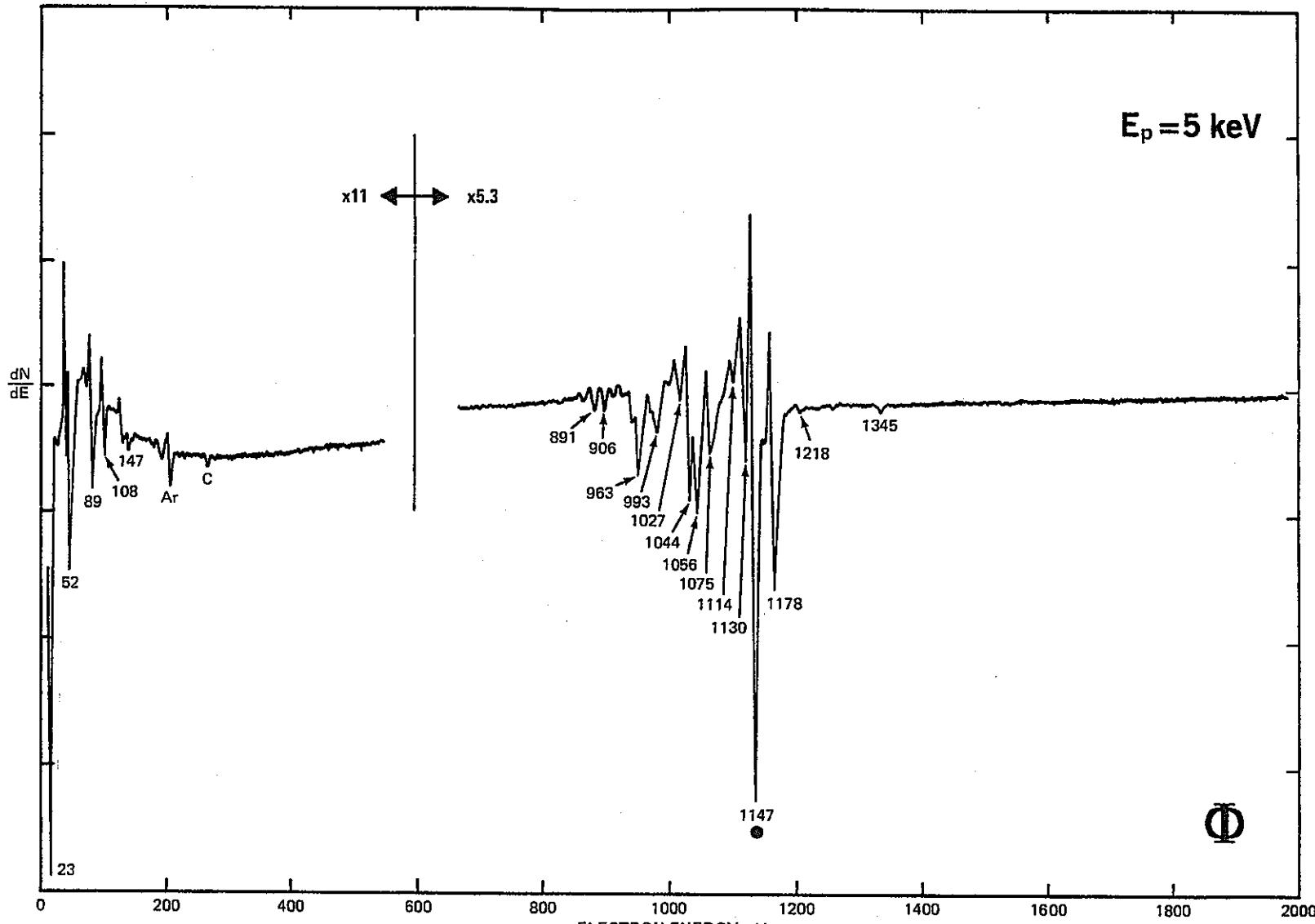


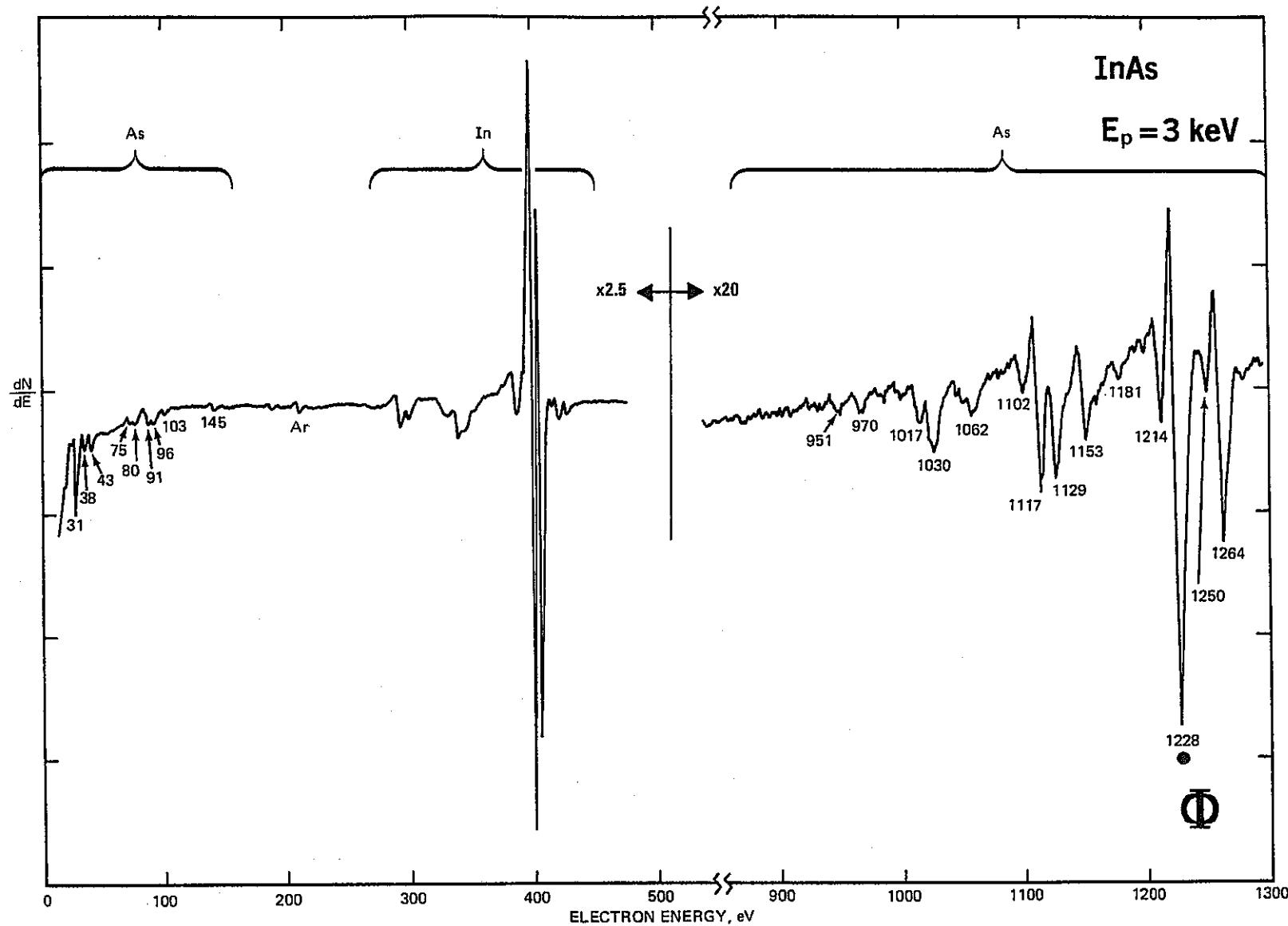


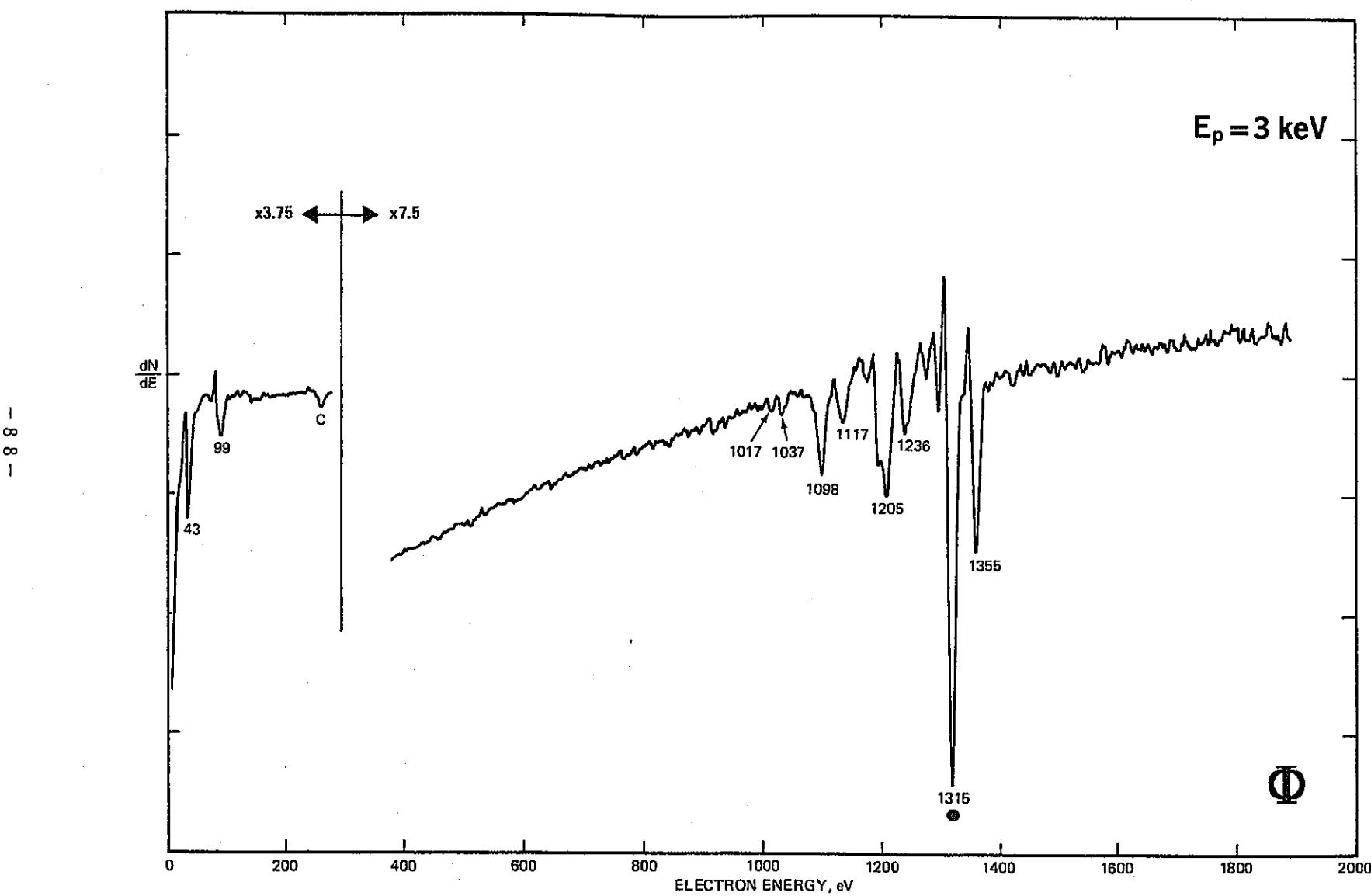




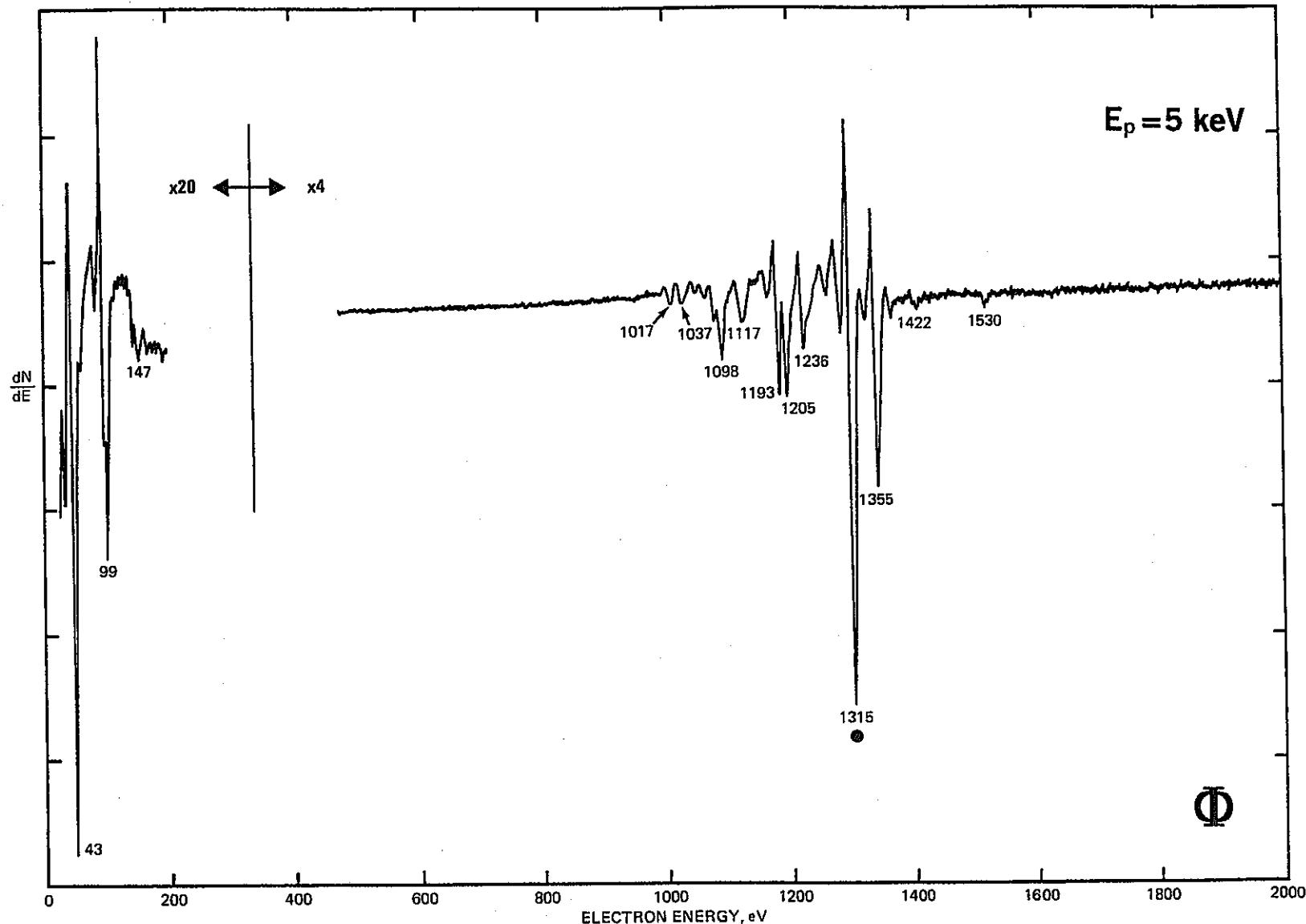
Germanium, Ge Atomic Number 32

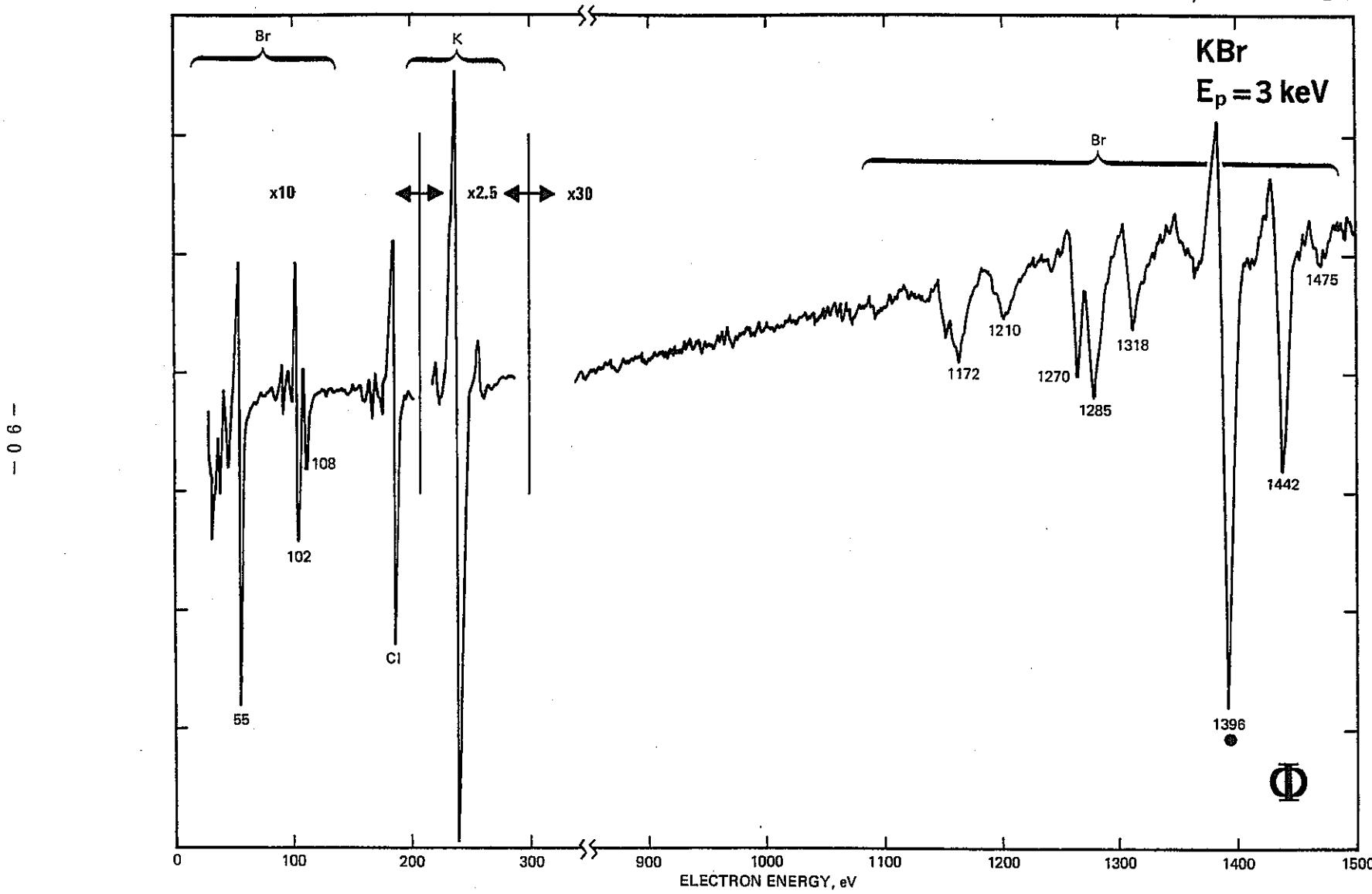




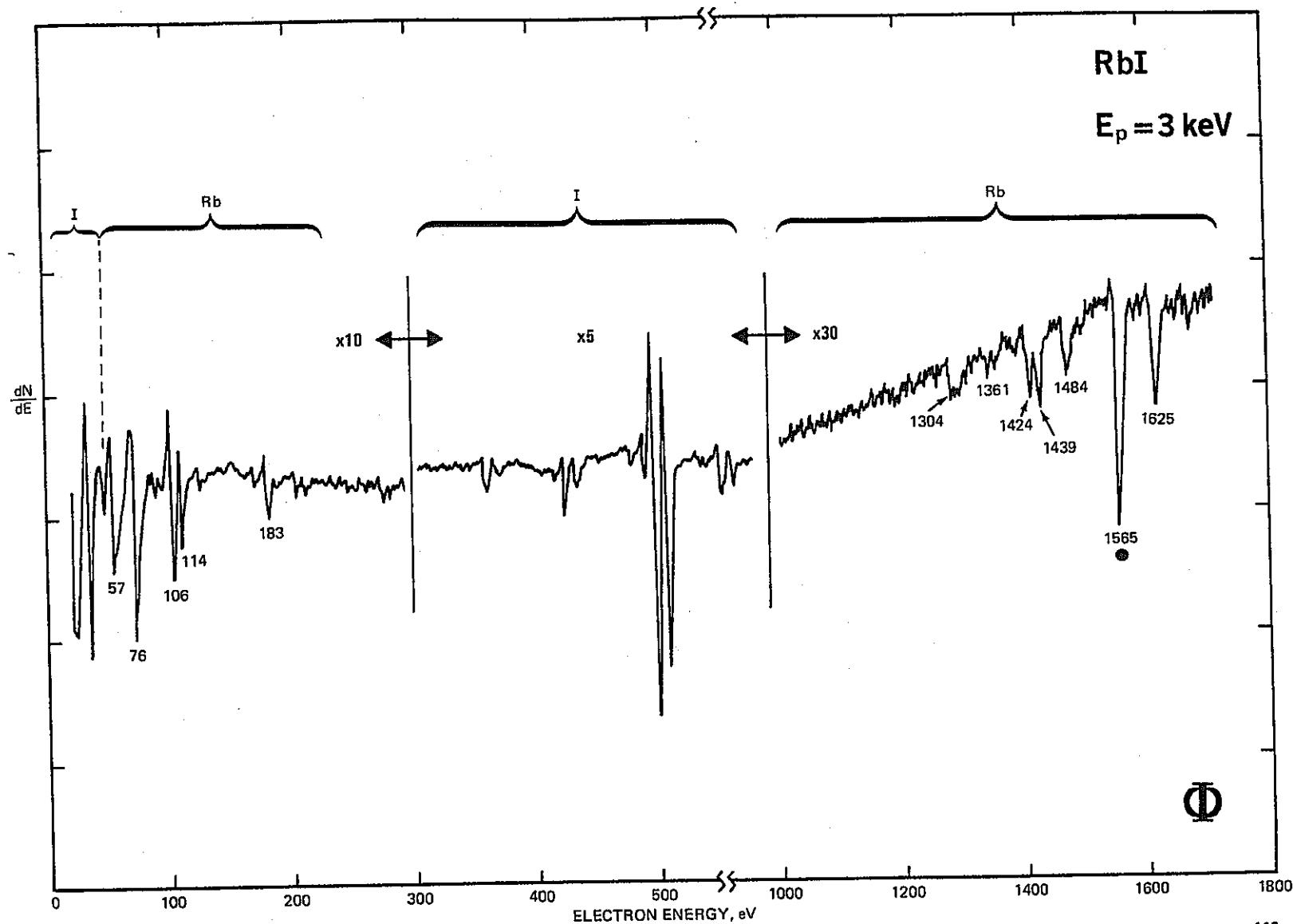


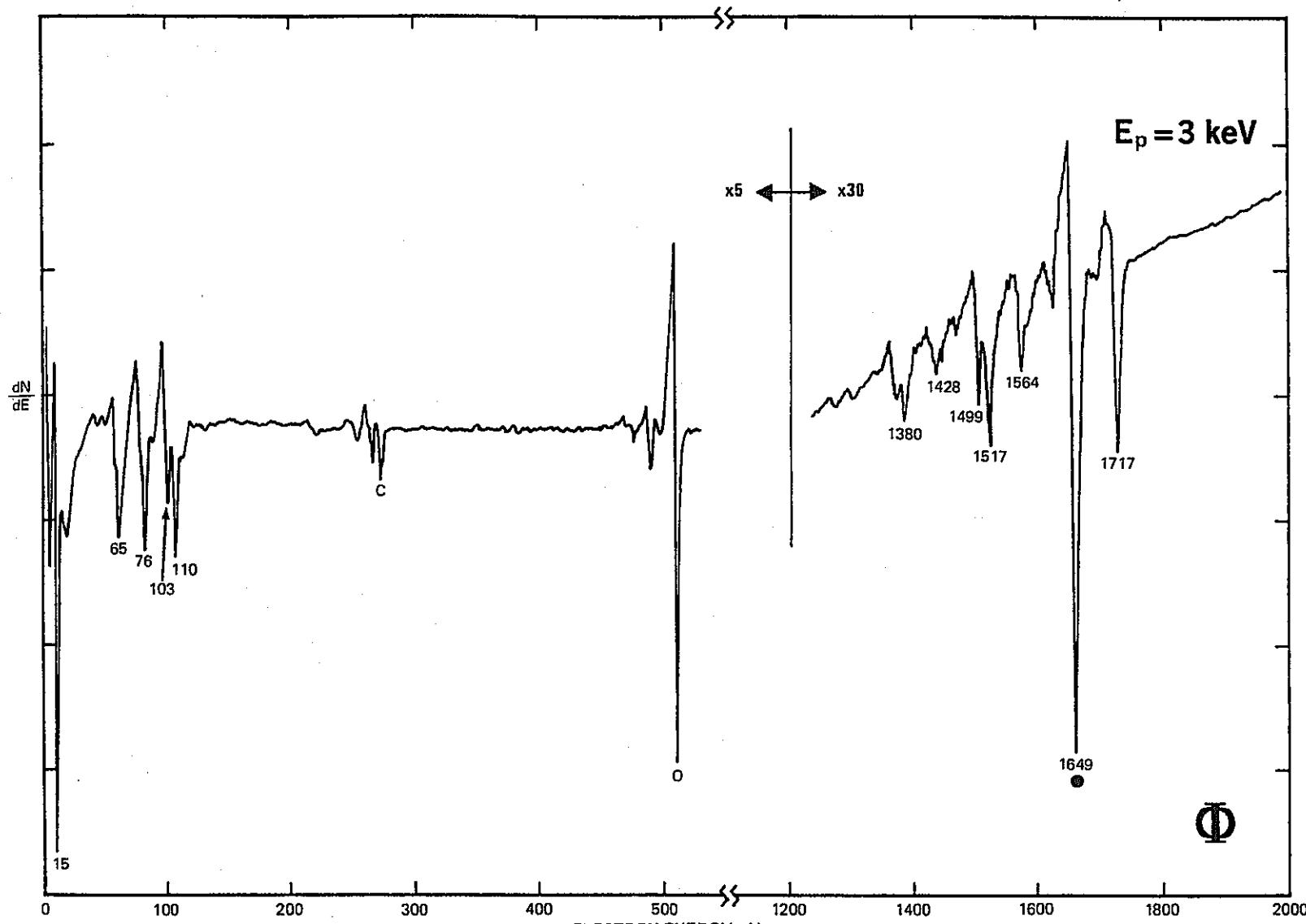
- 68 -



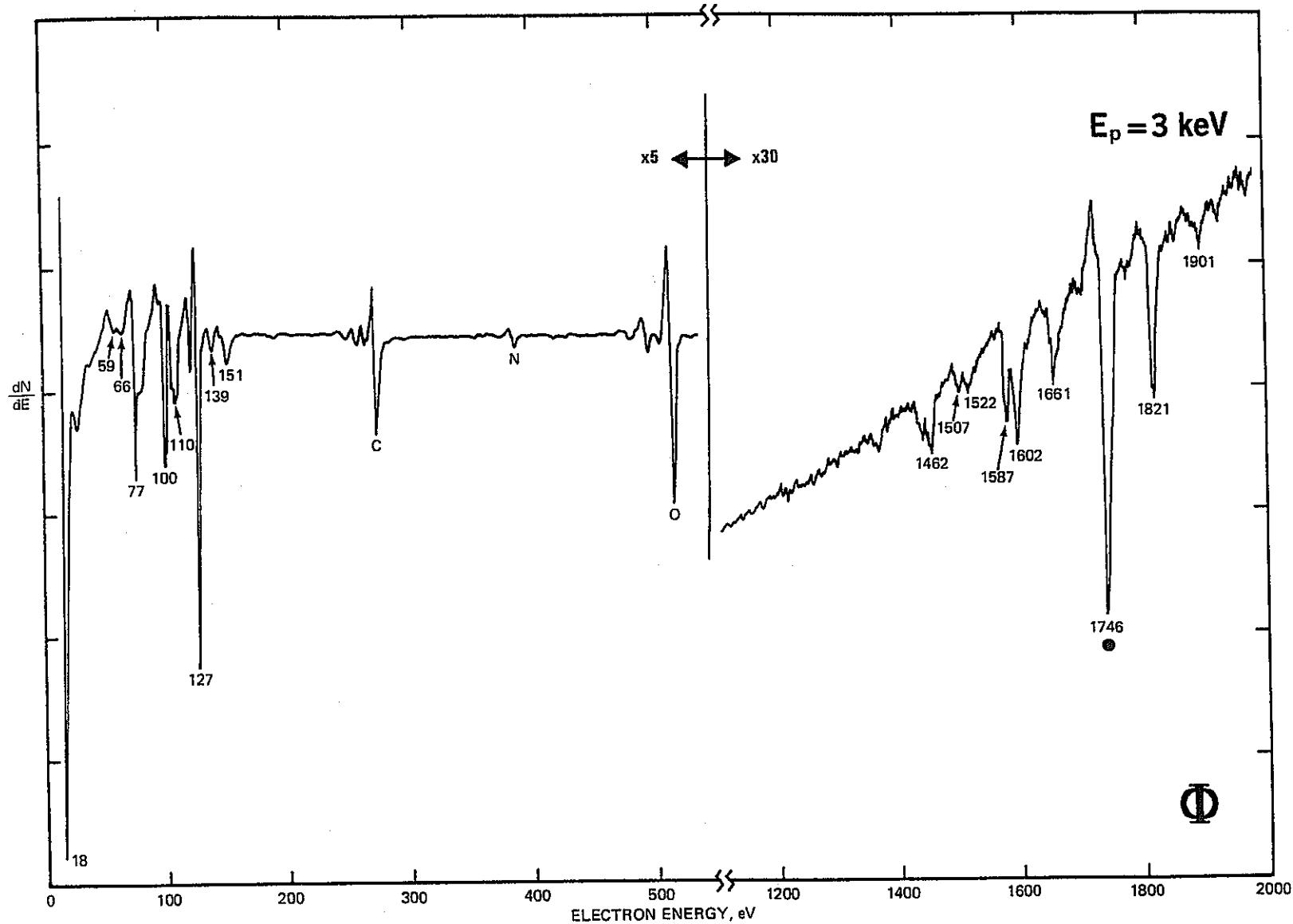


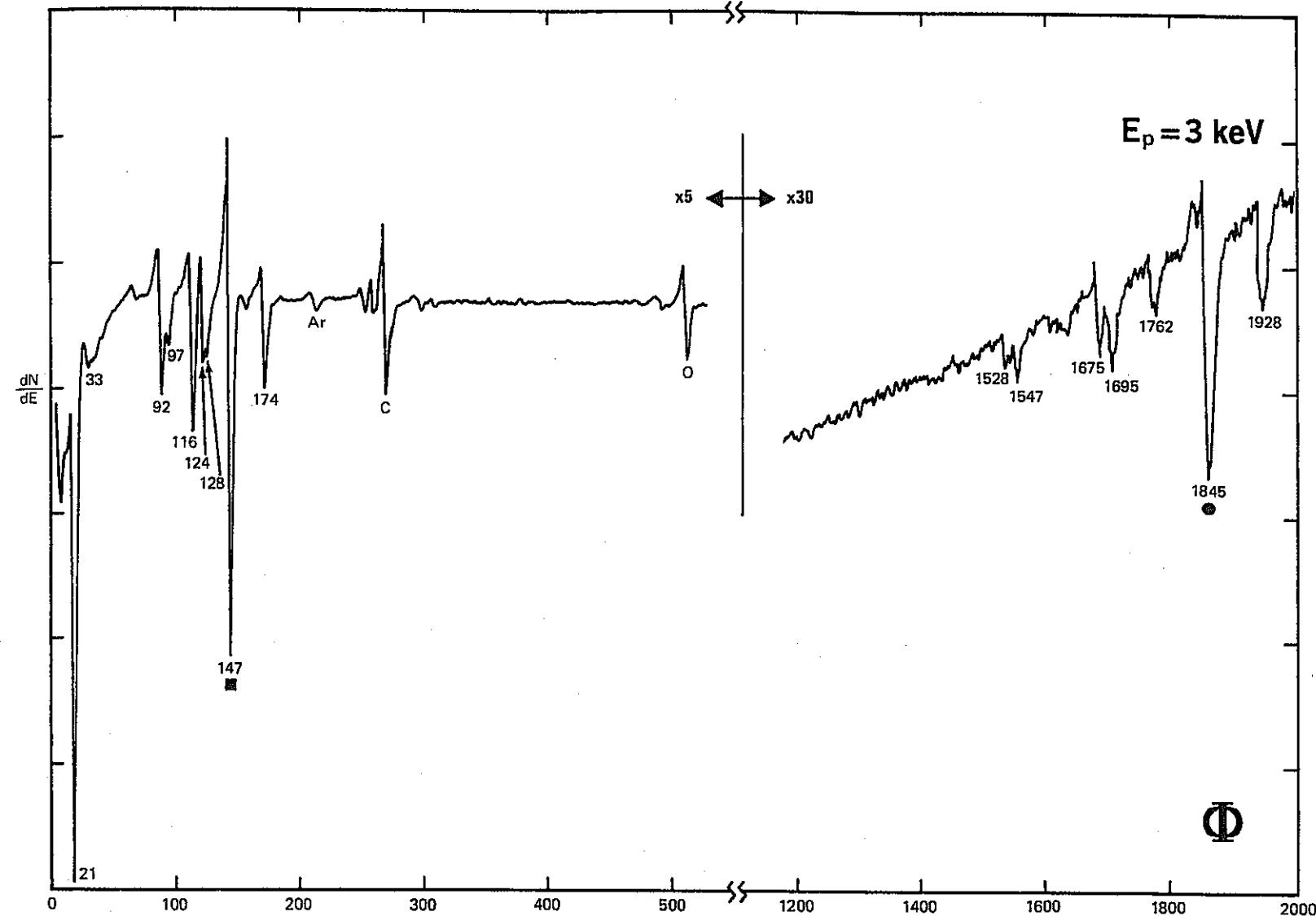
Rubidium, Rb Atomic Number 37

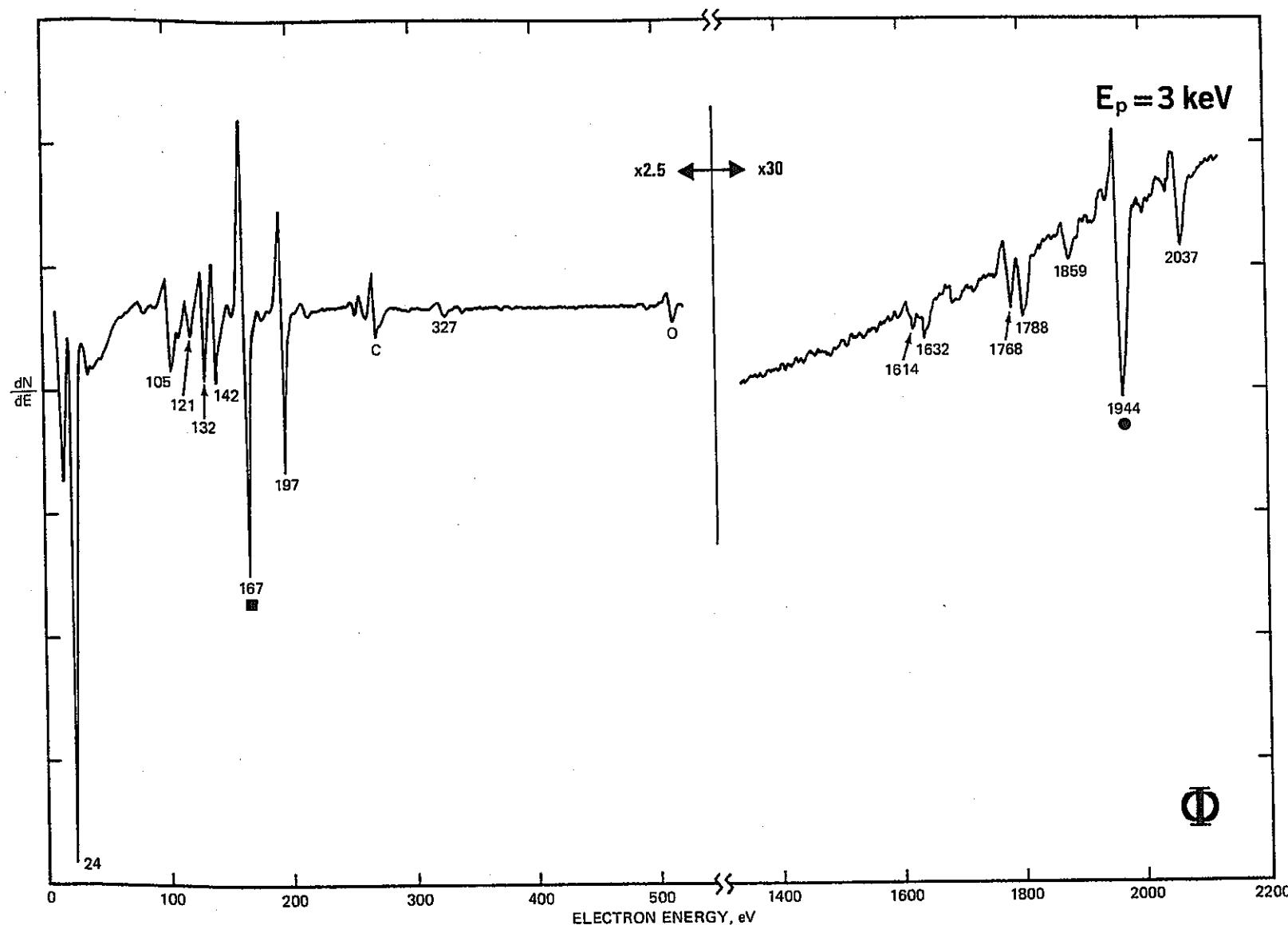


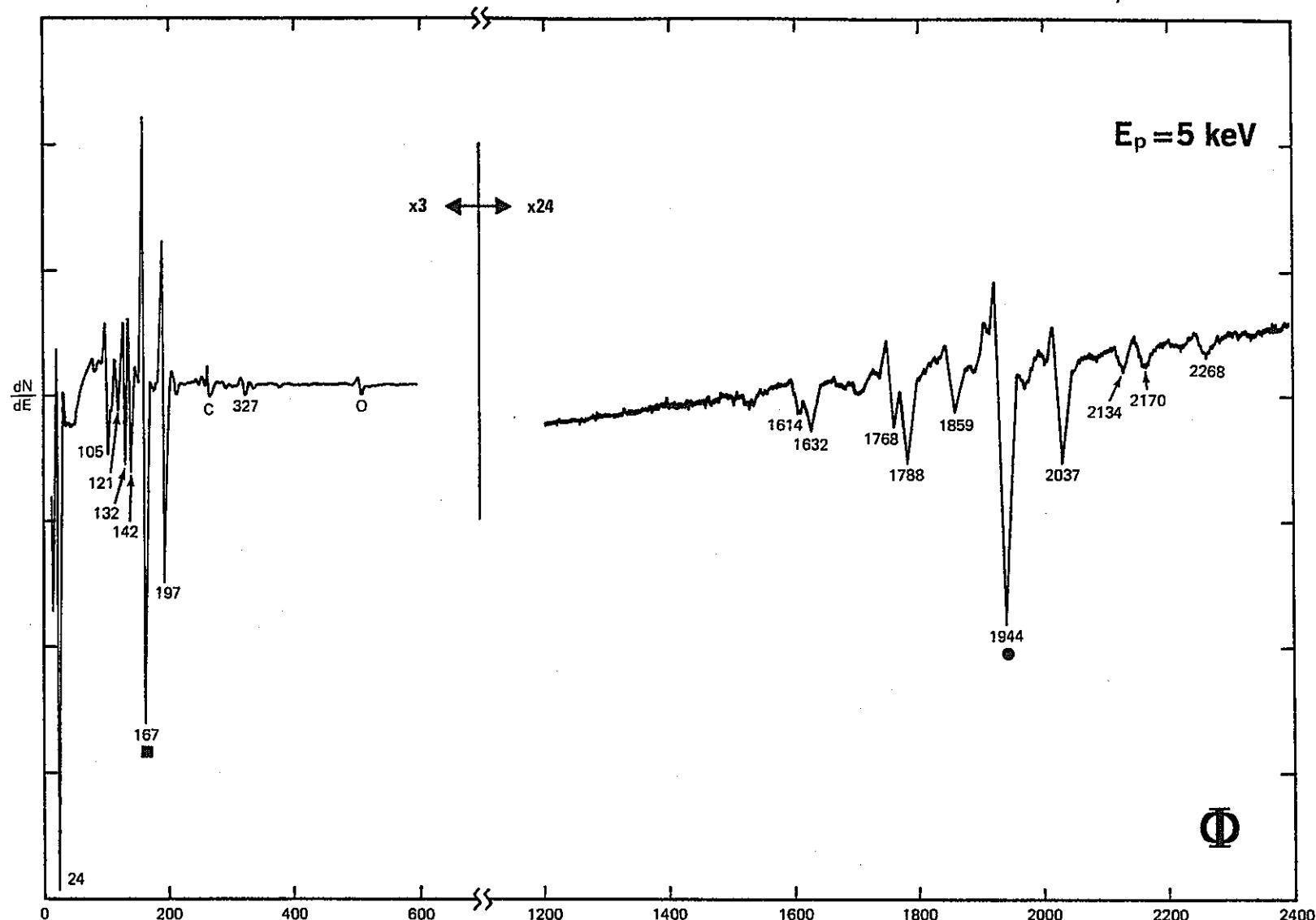


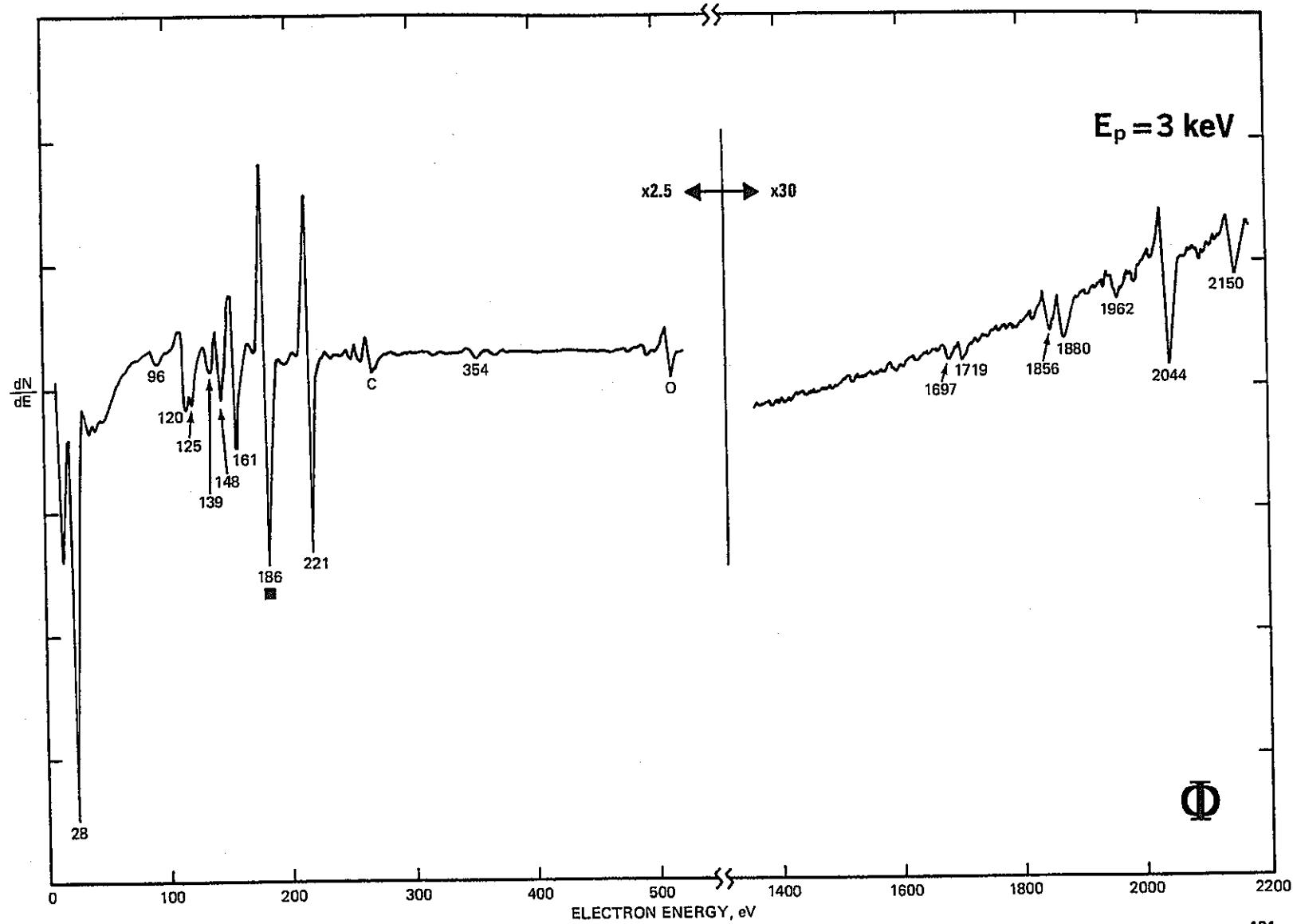
Yttrium, Y Atomic Number 39

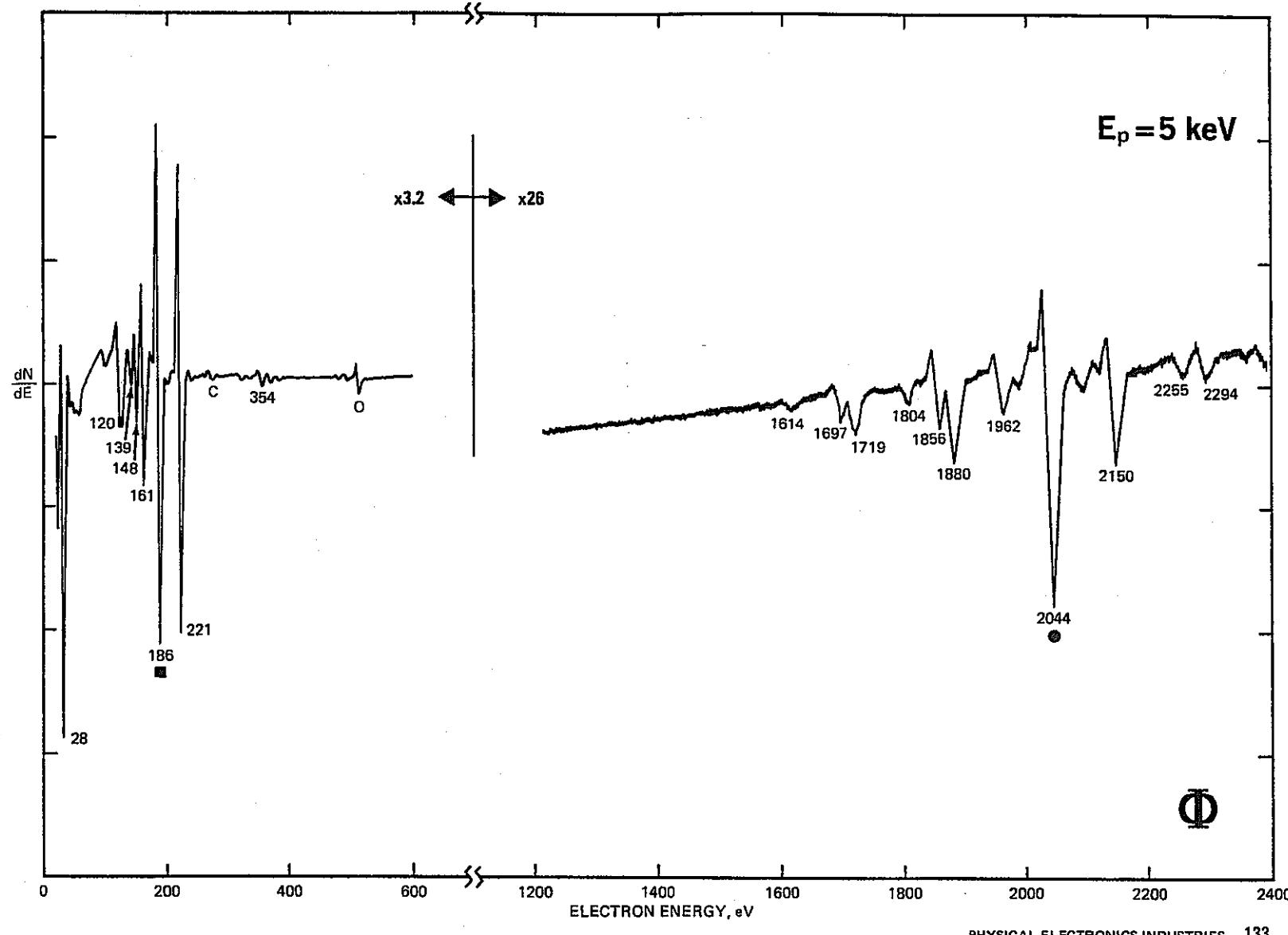


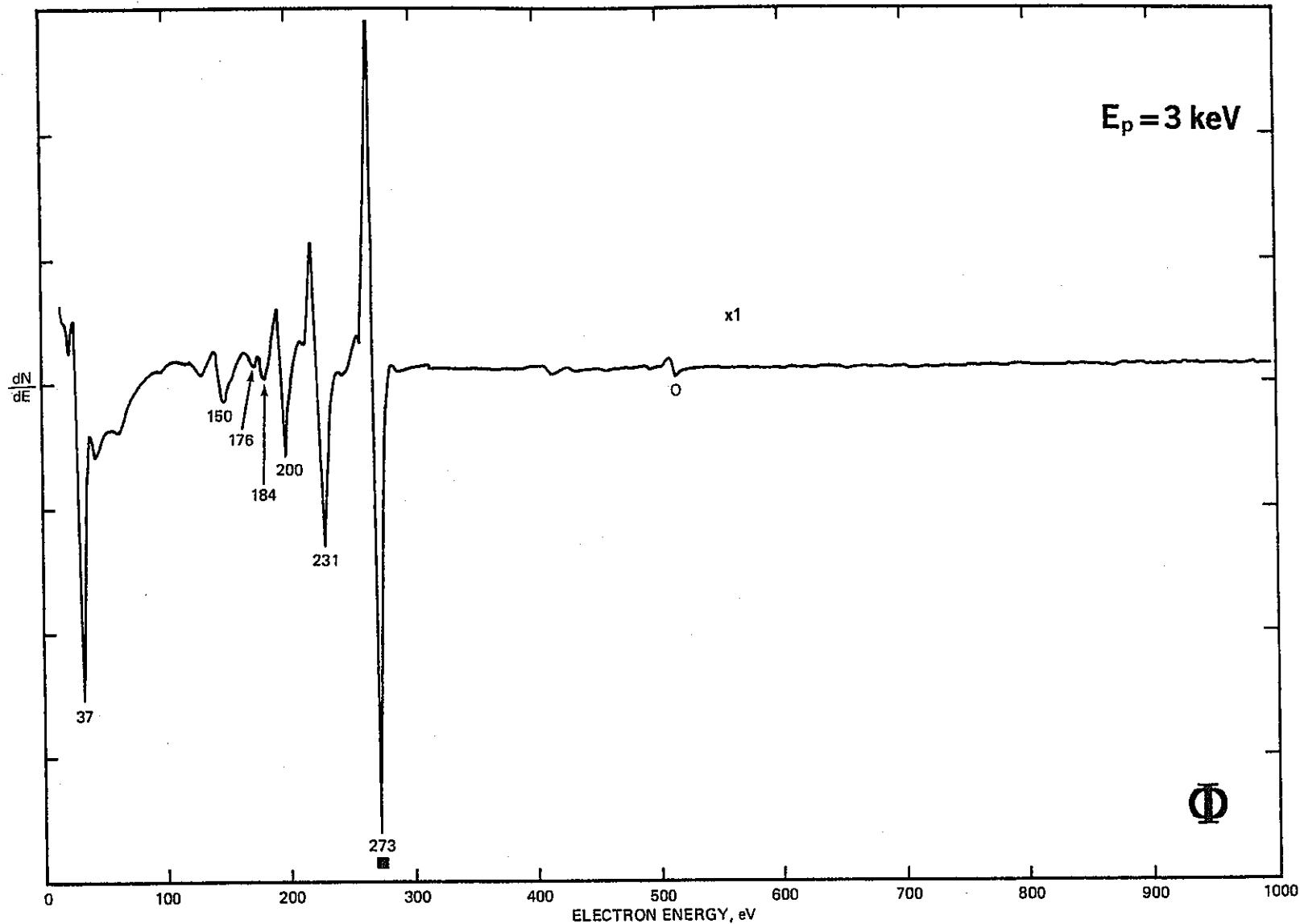


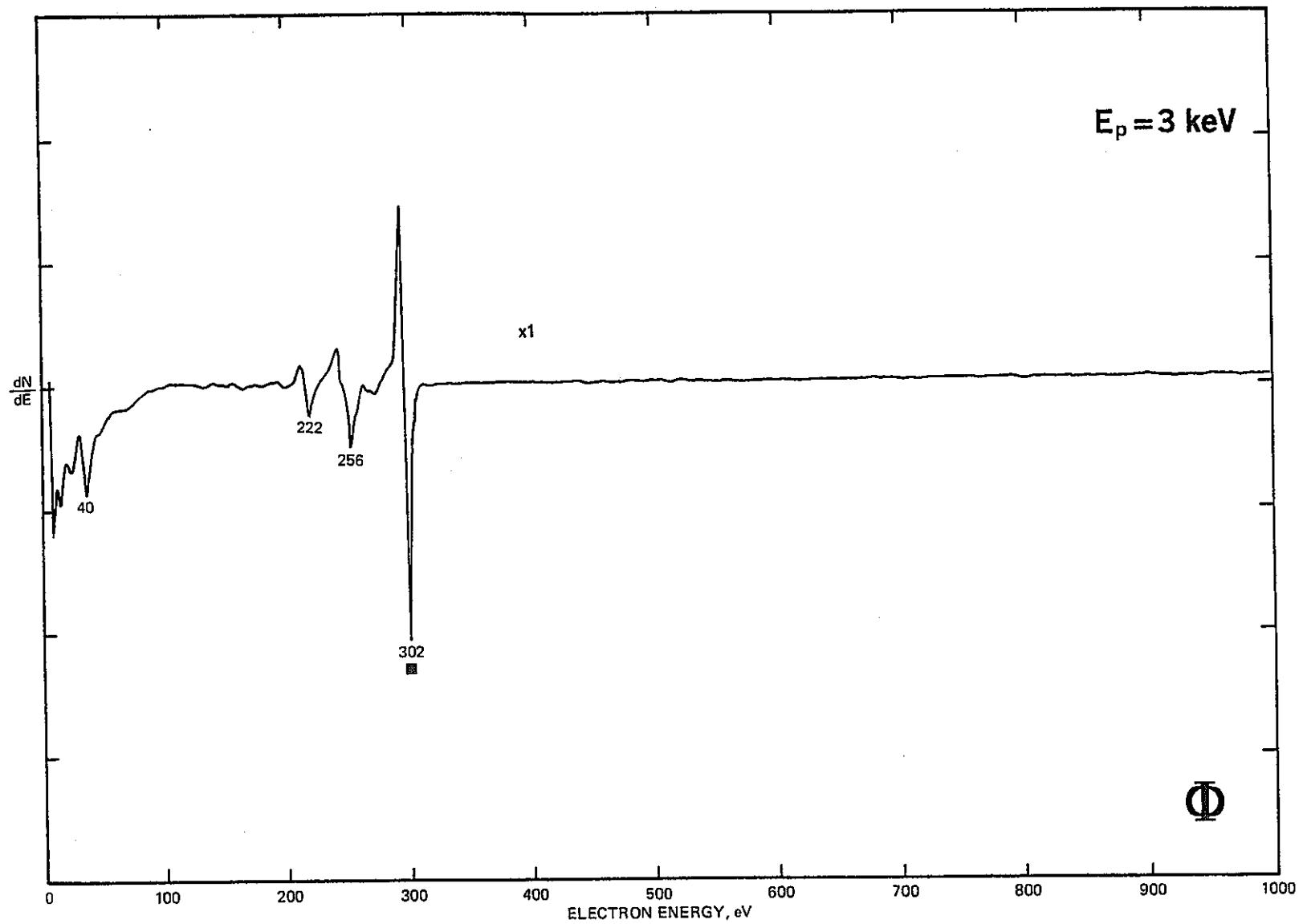


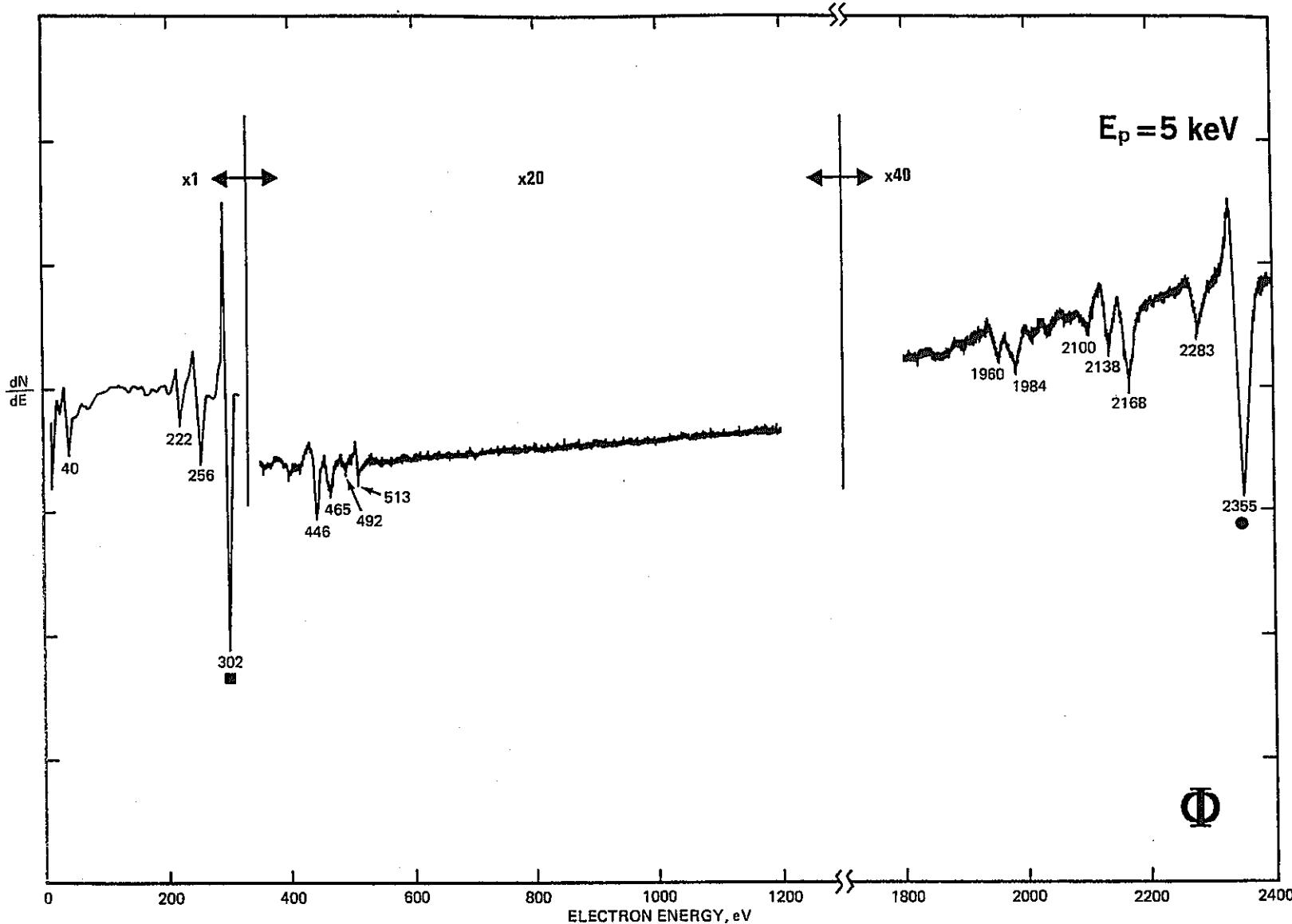


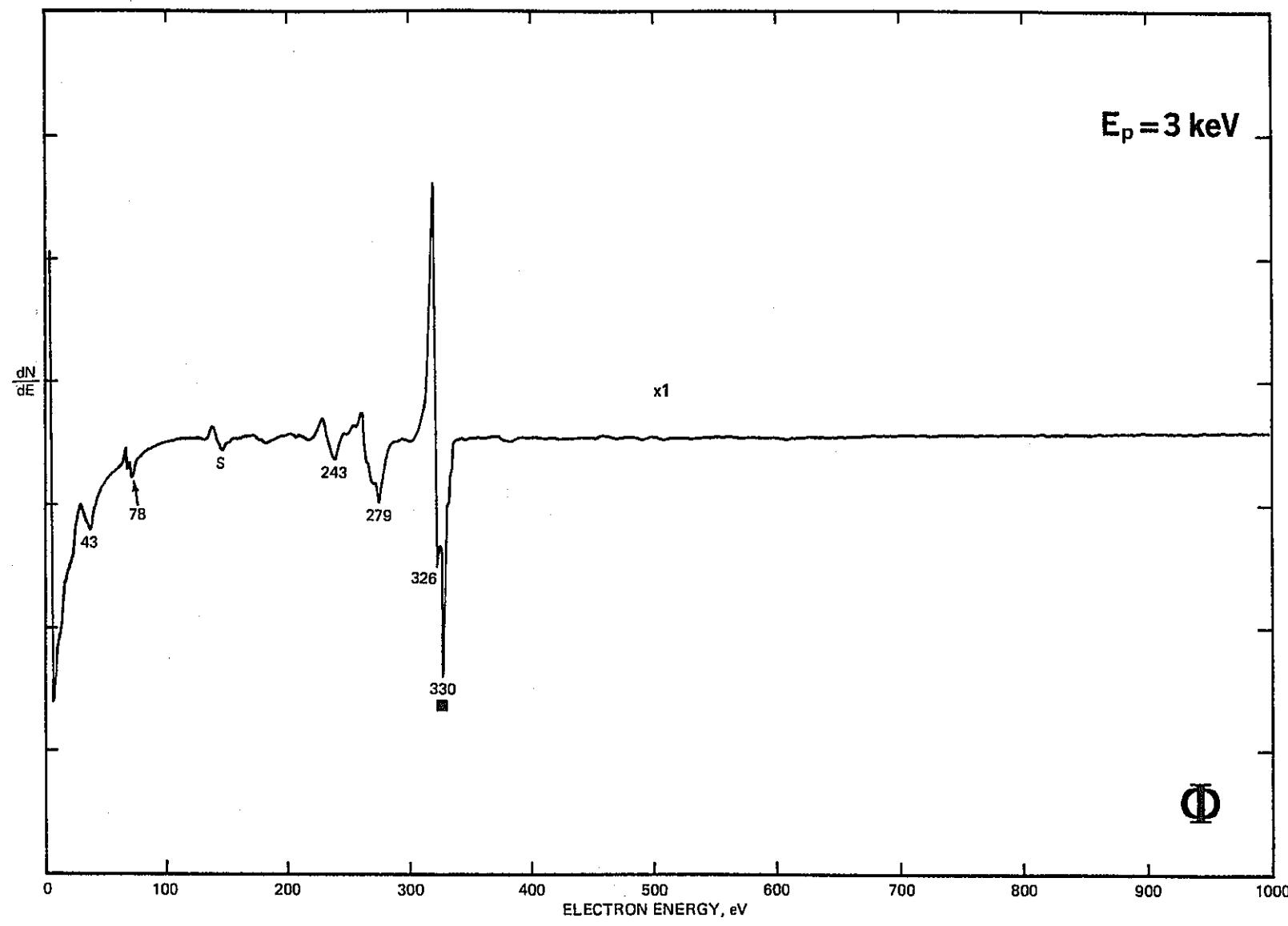






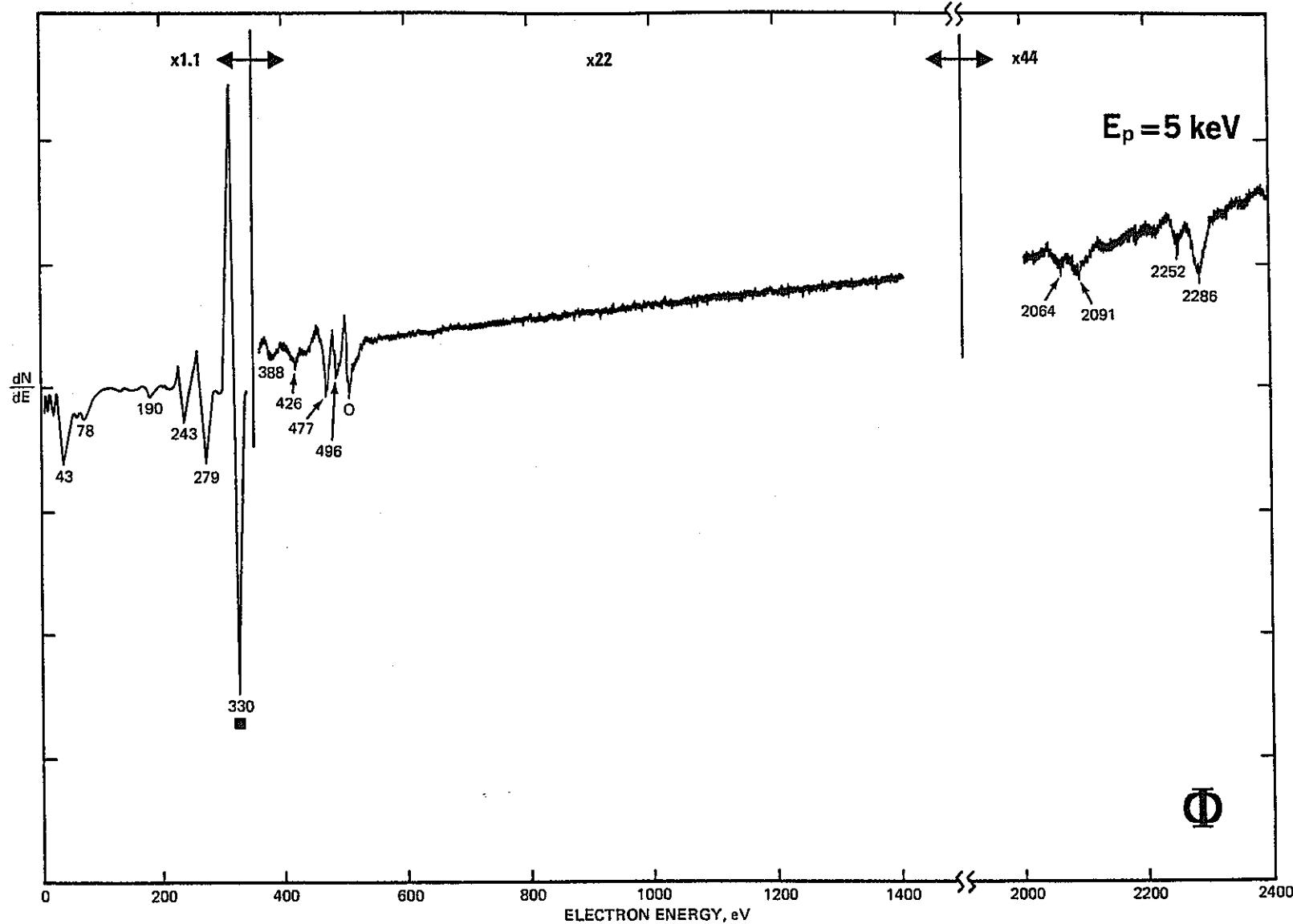


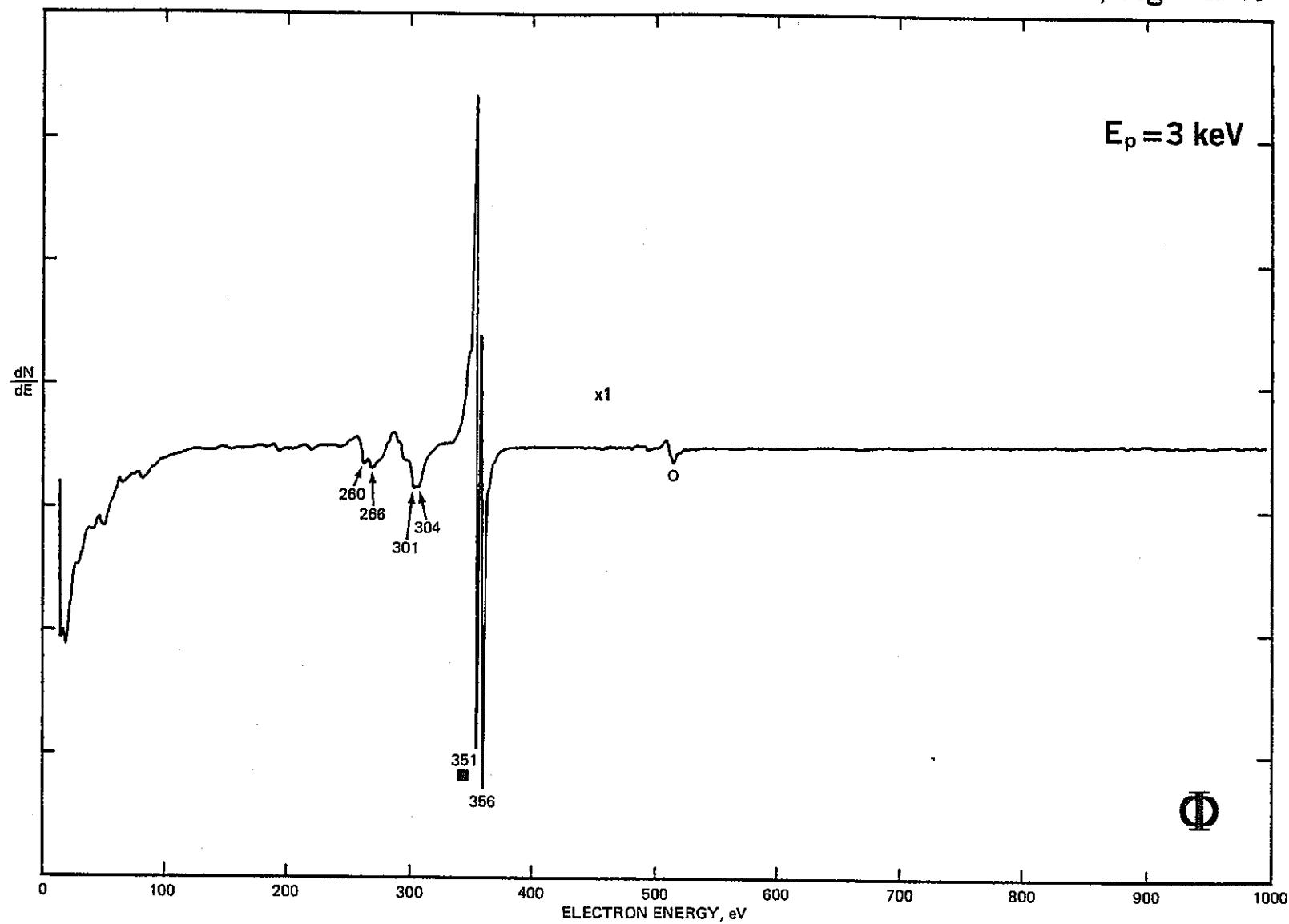


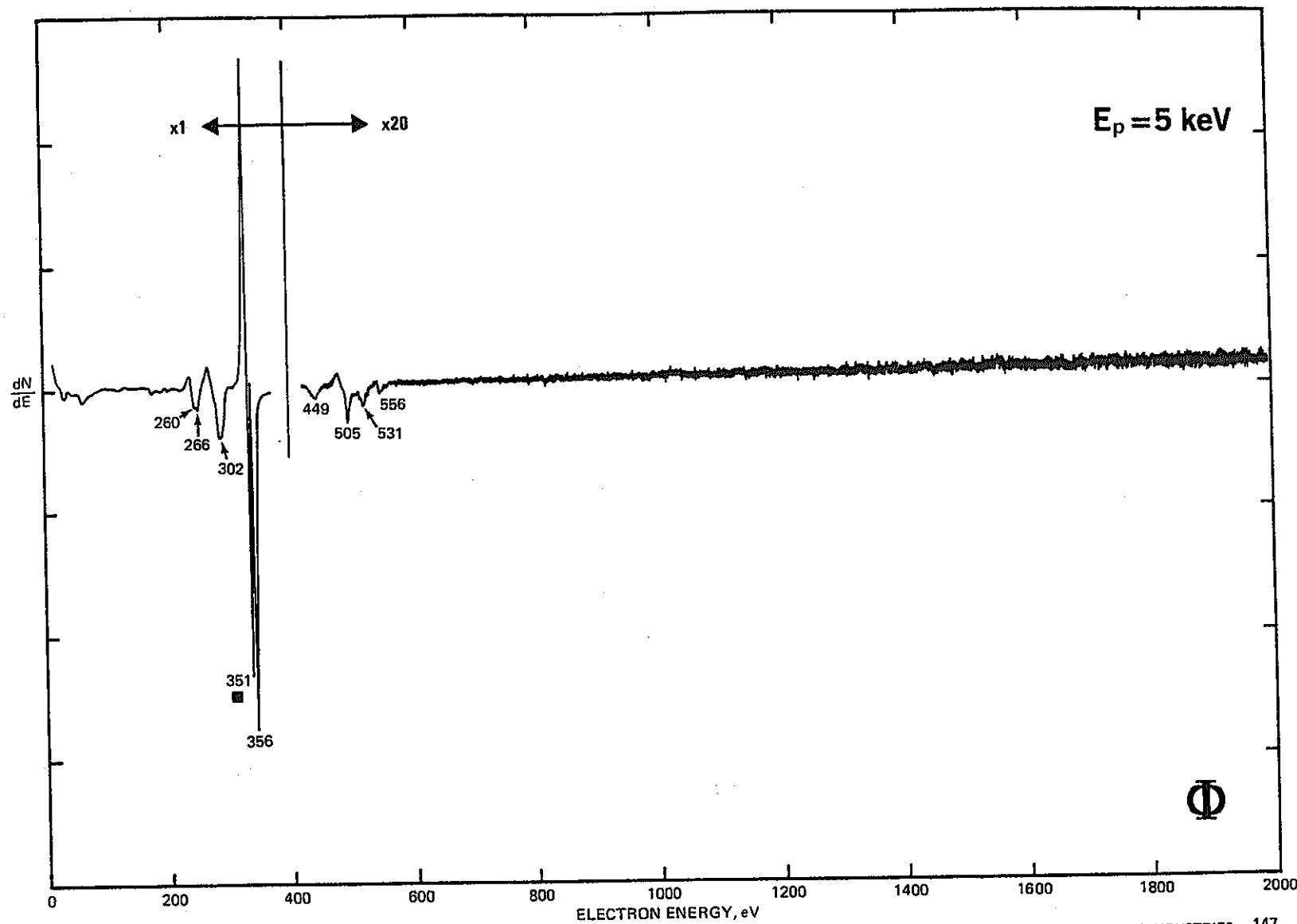


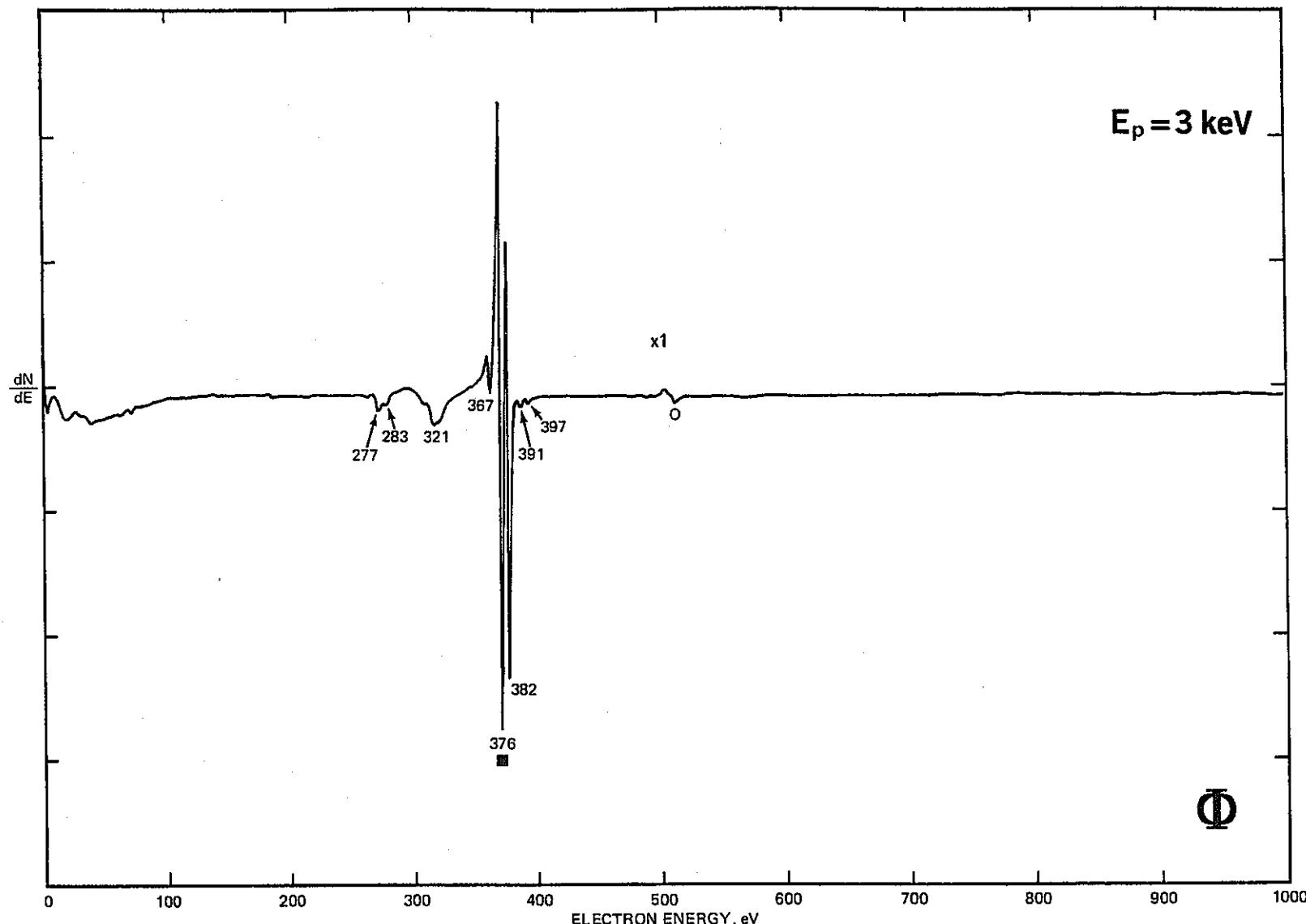
HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

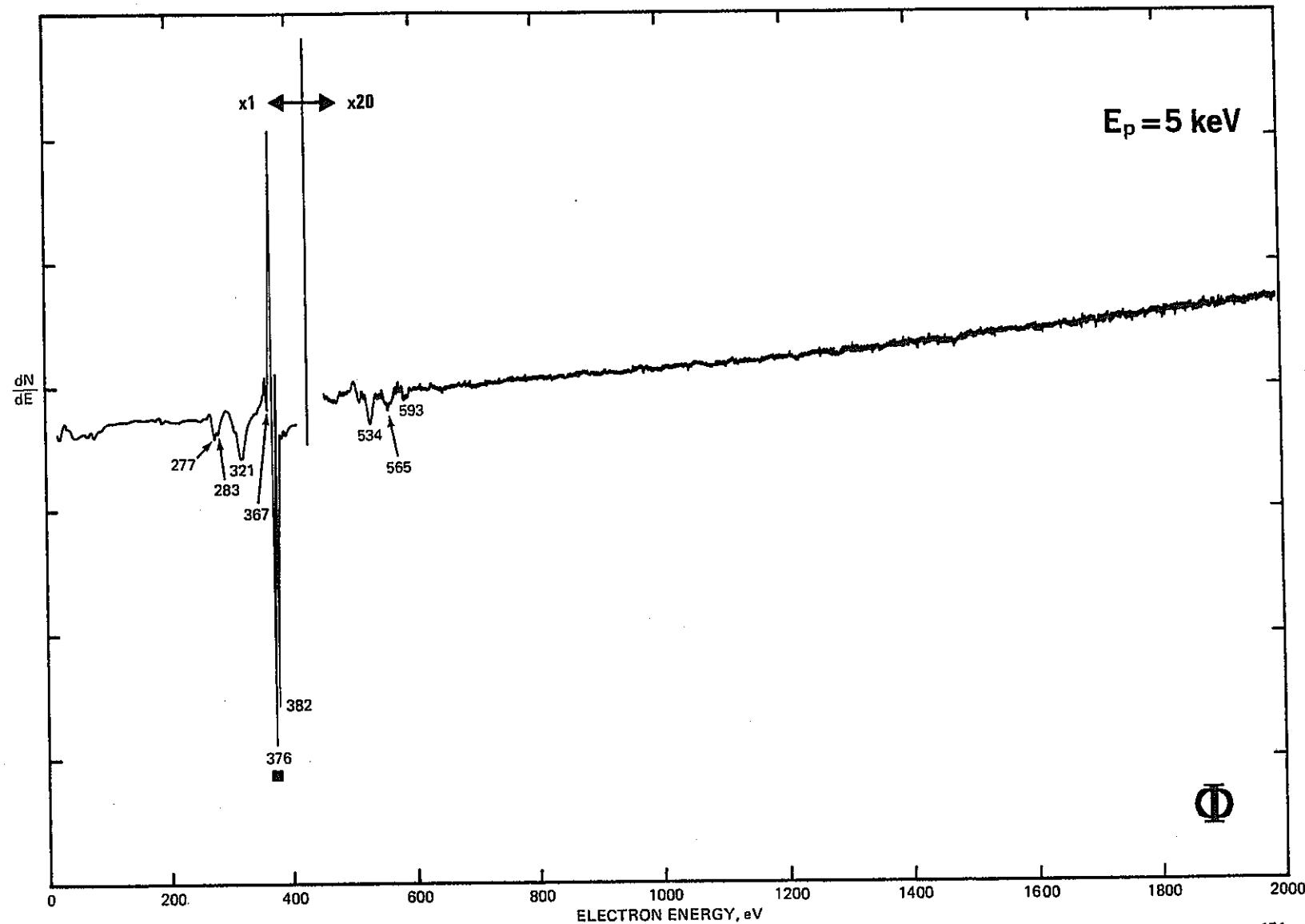
Palladium, Pd Atomic Number 46

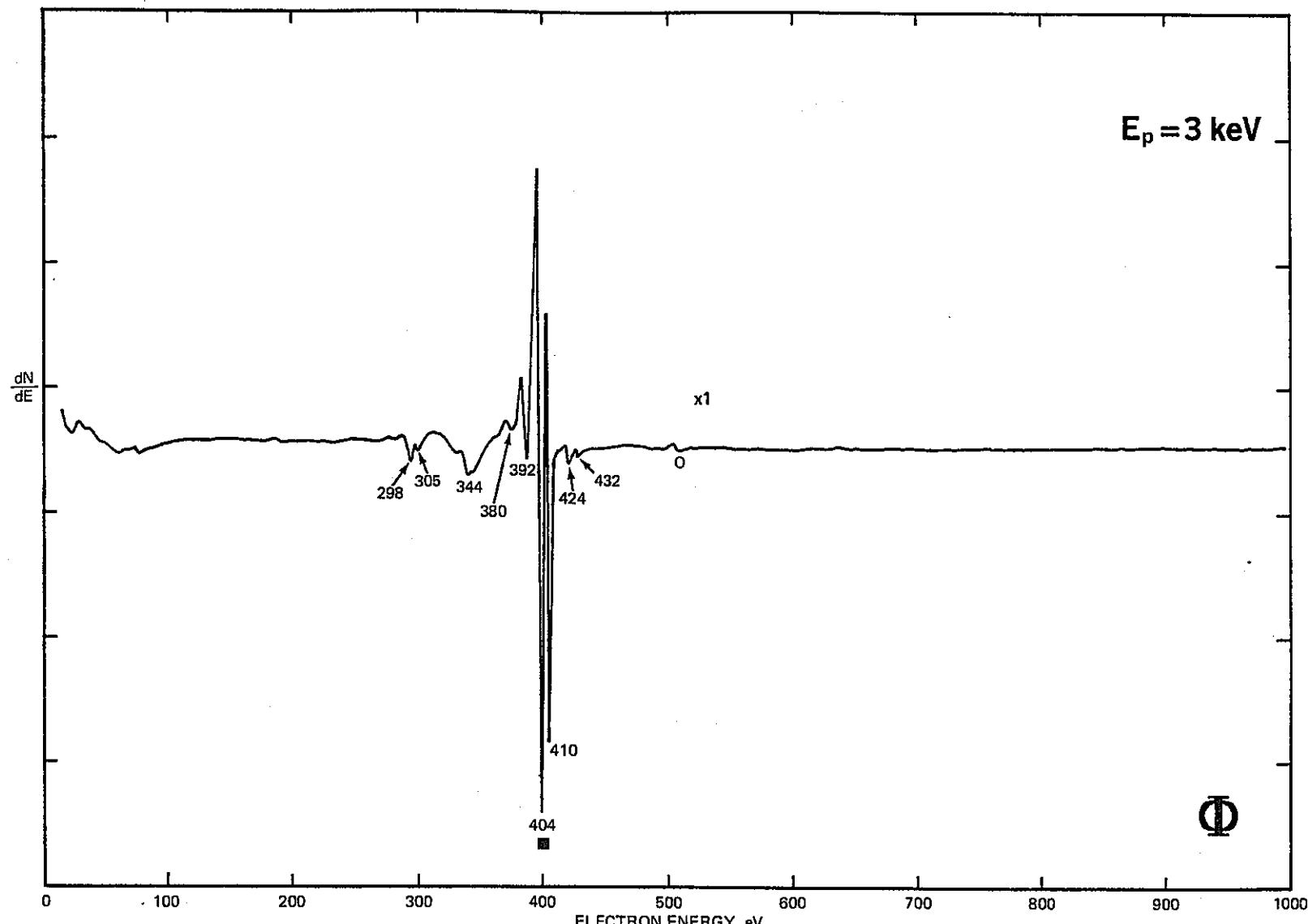


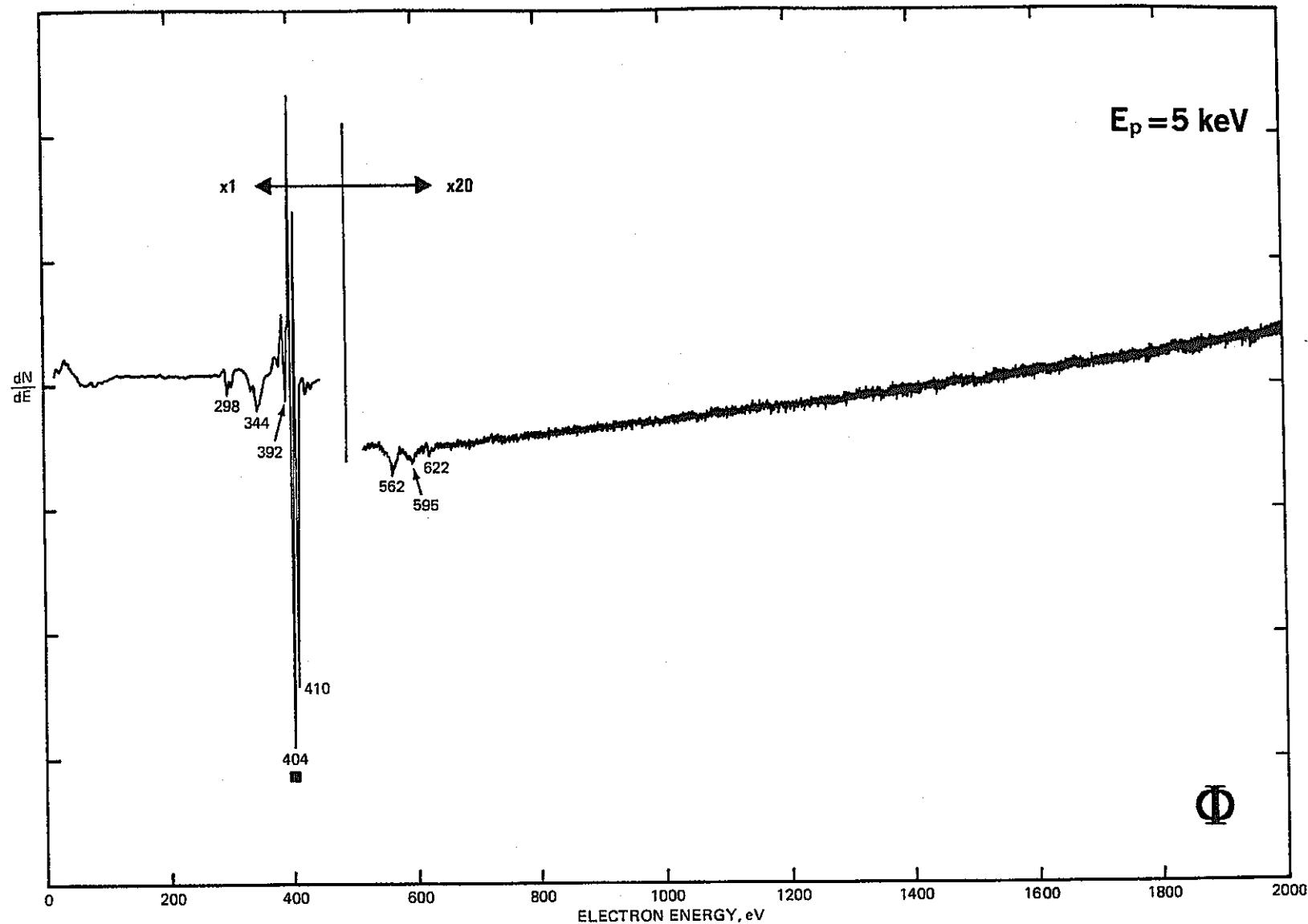


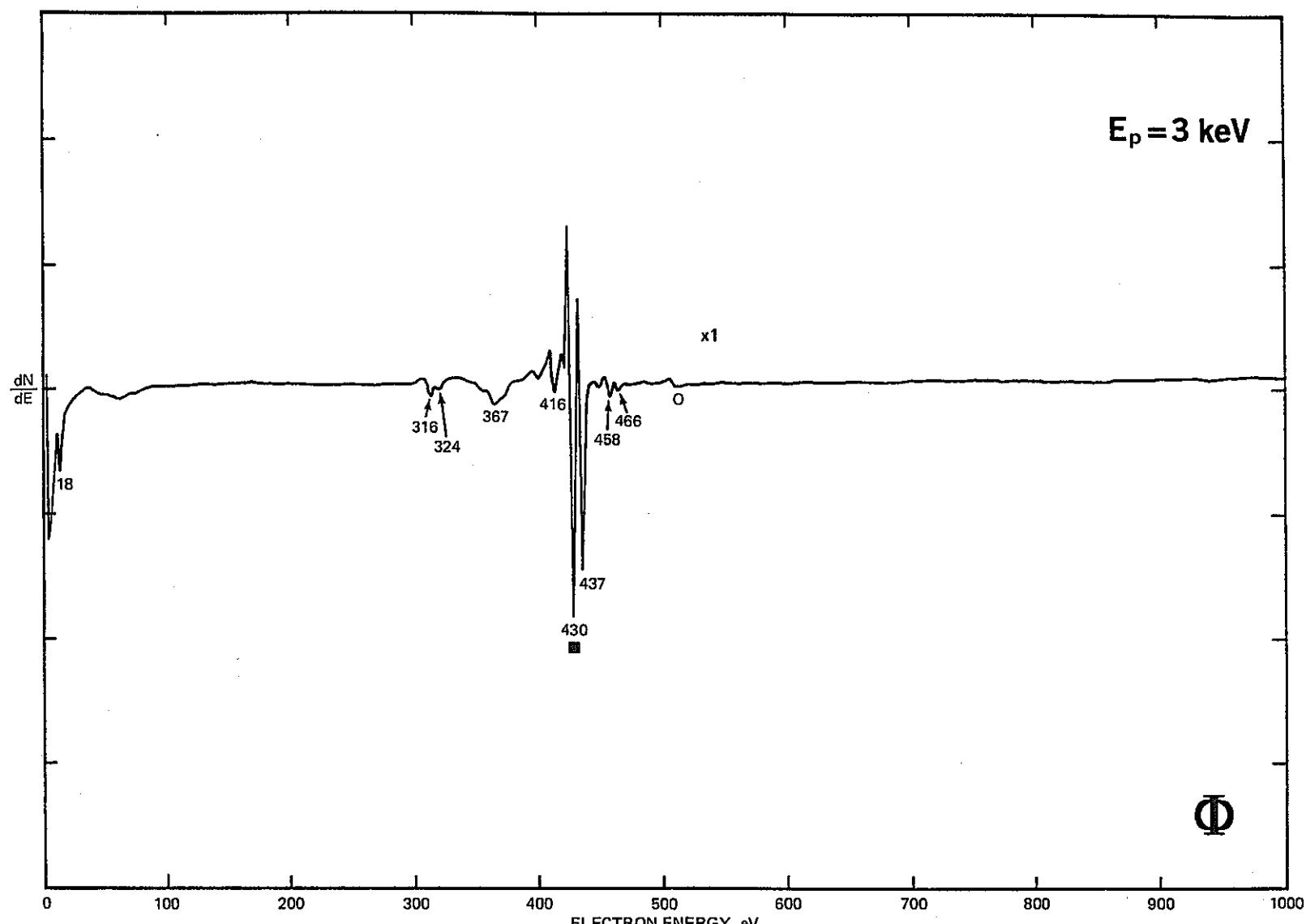


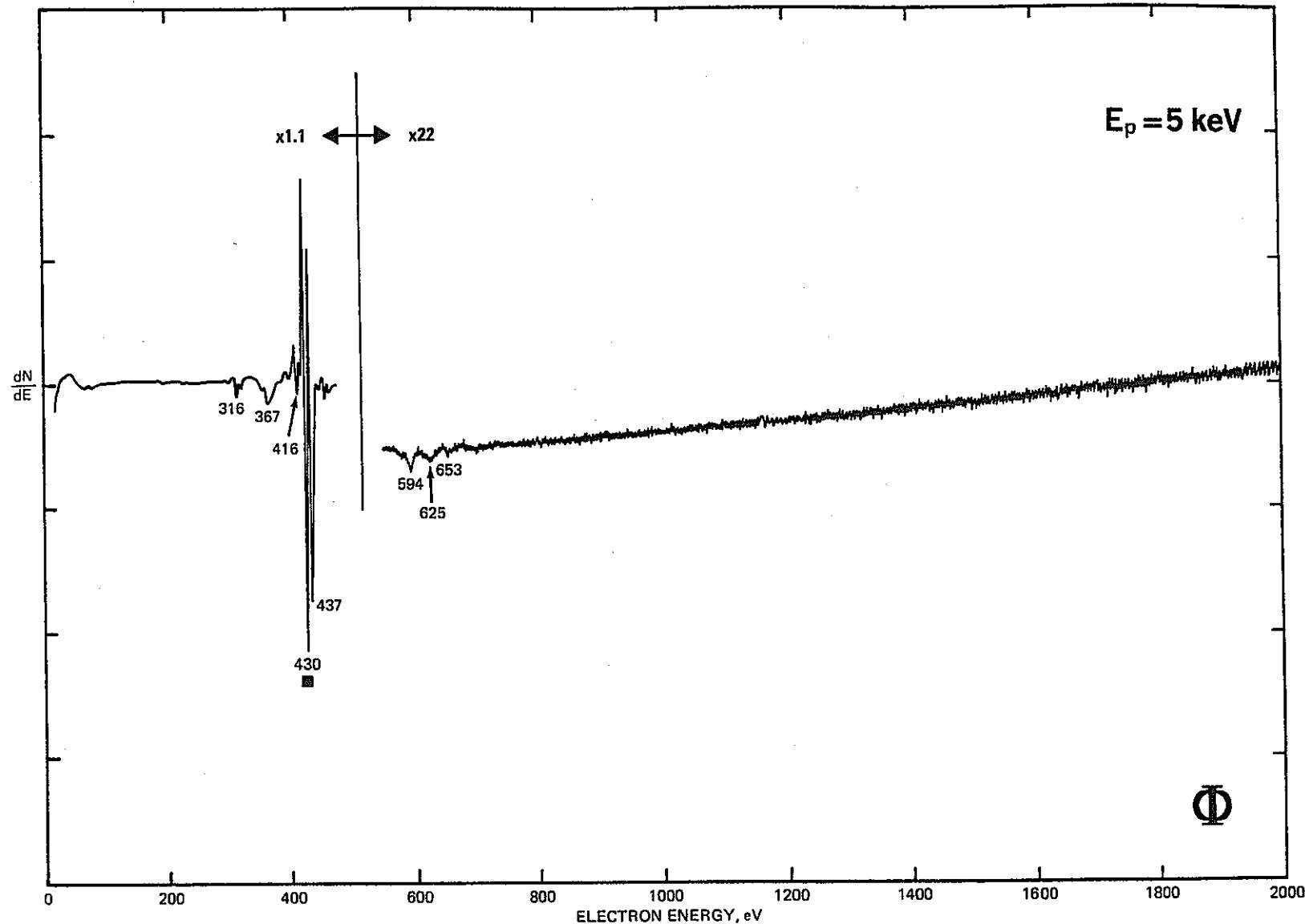


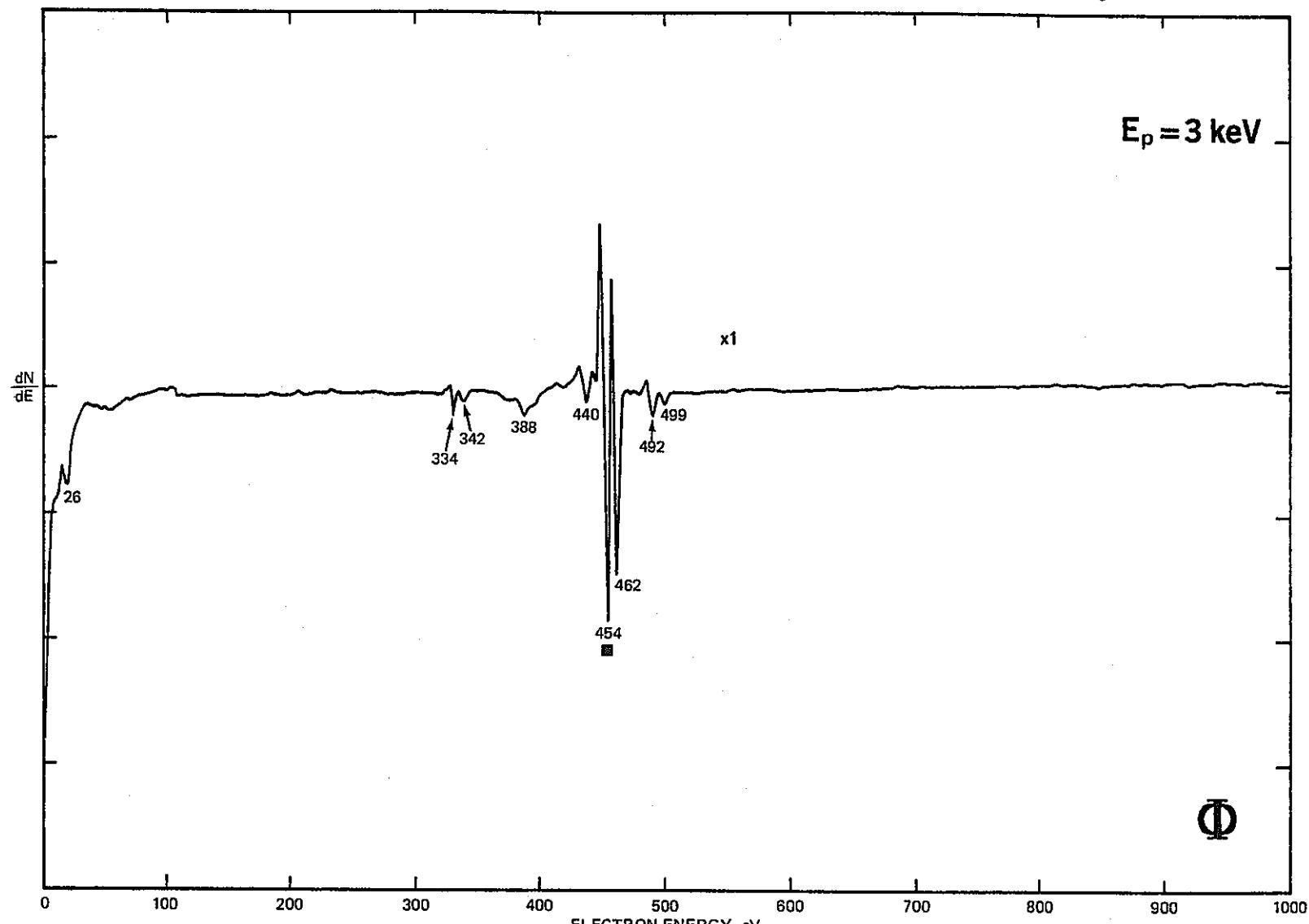


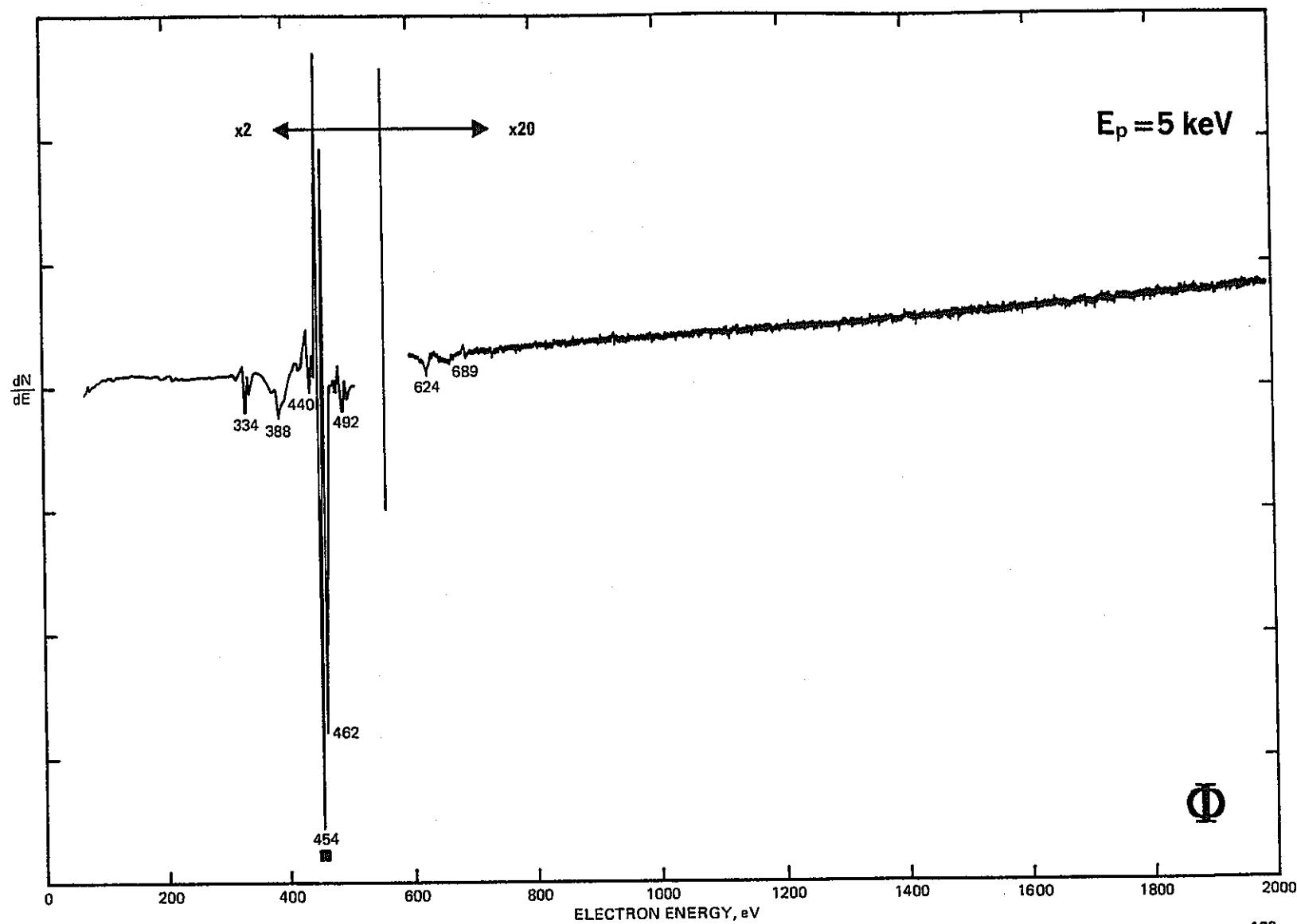


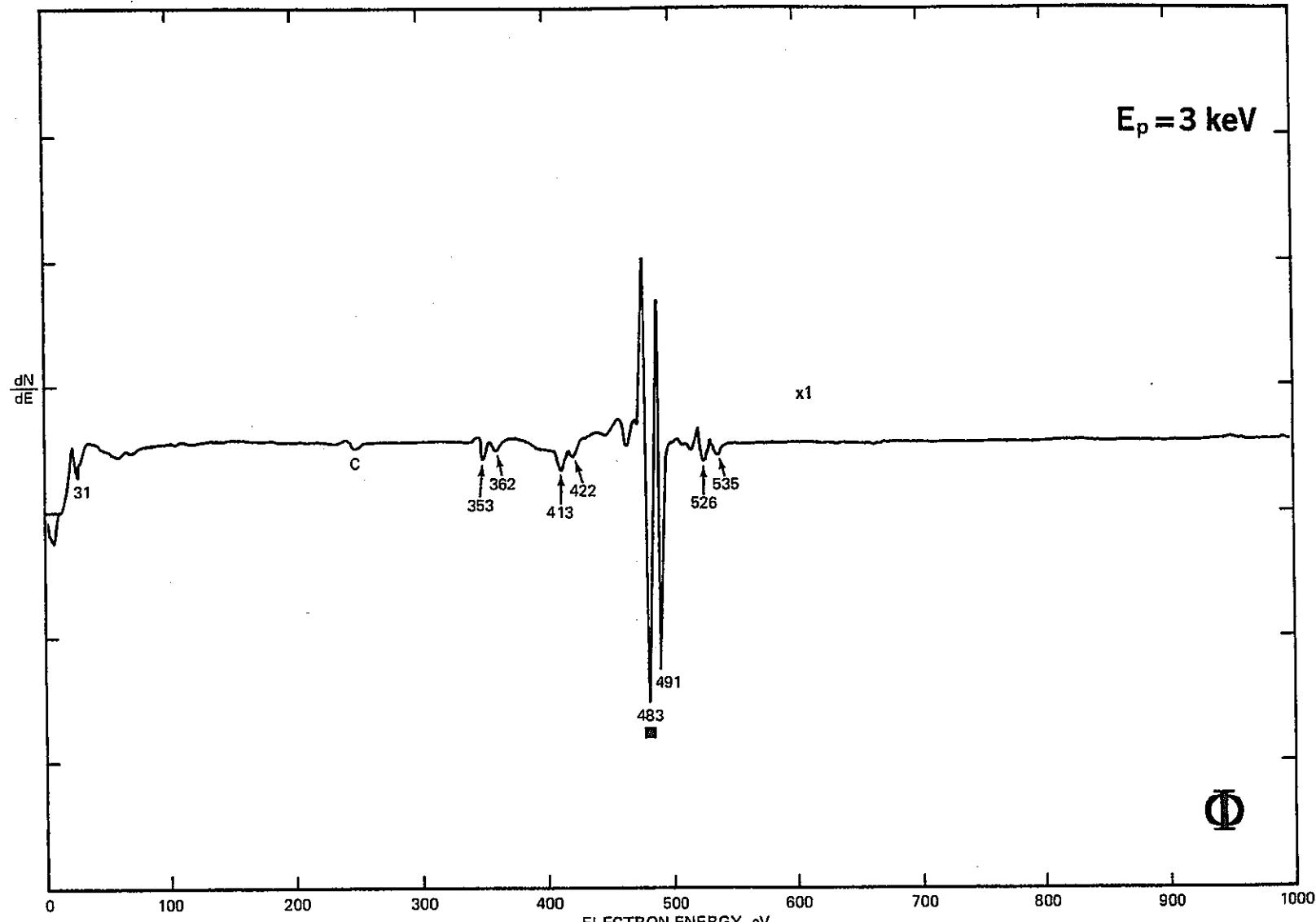


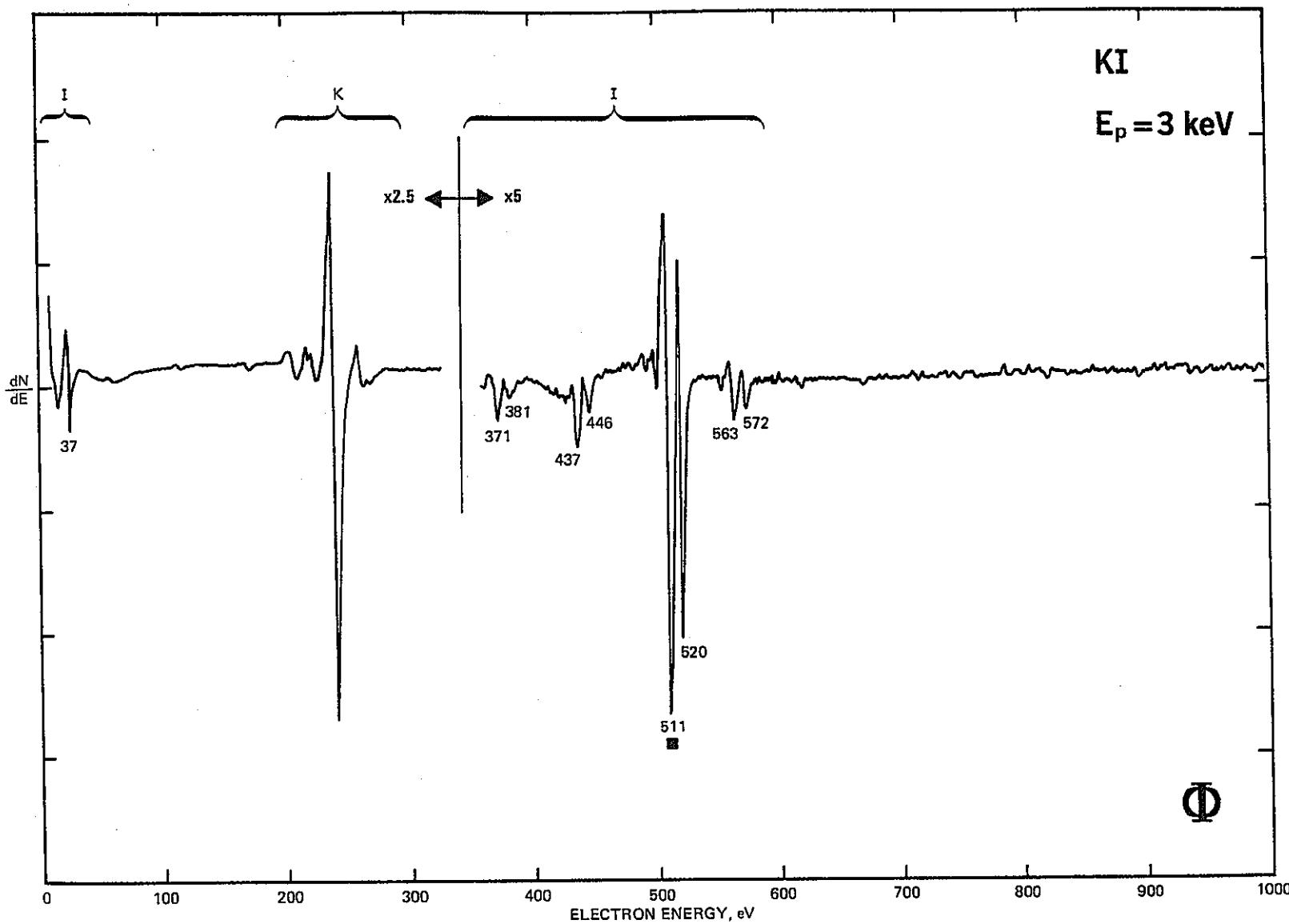


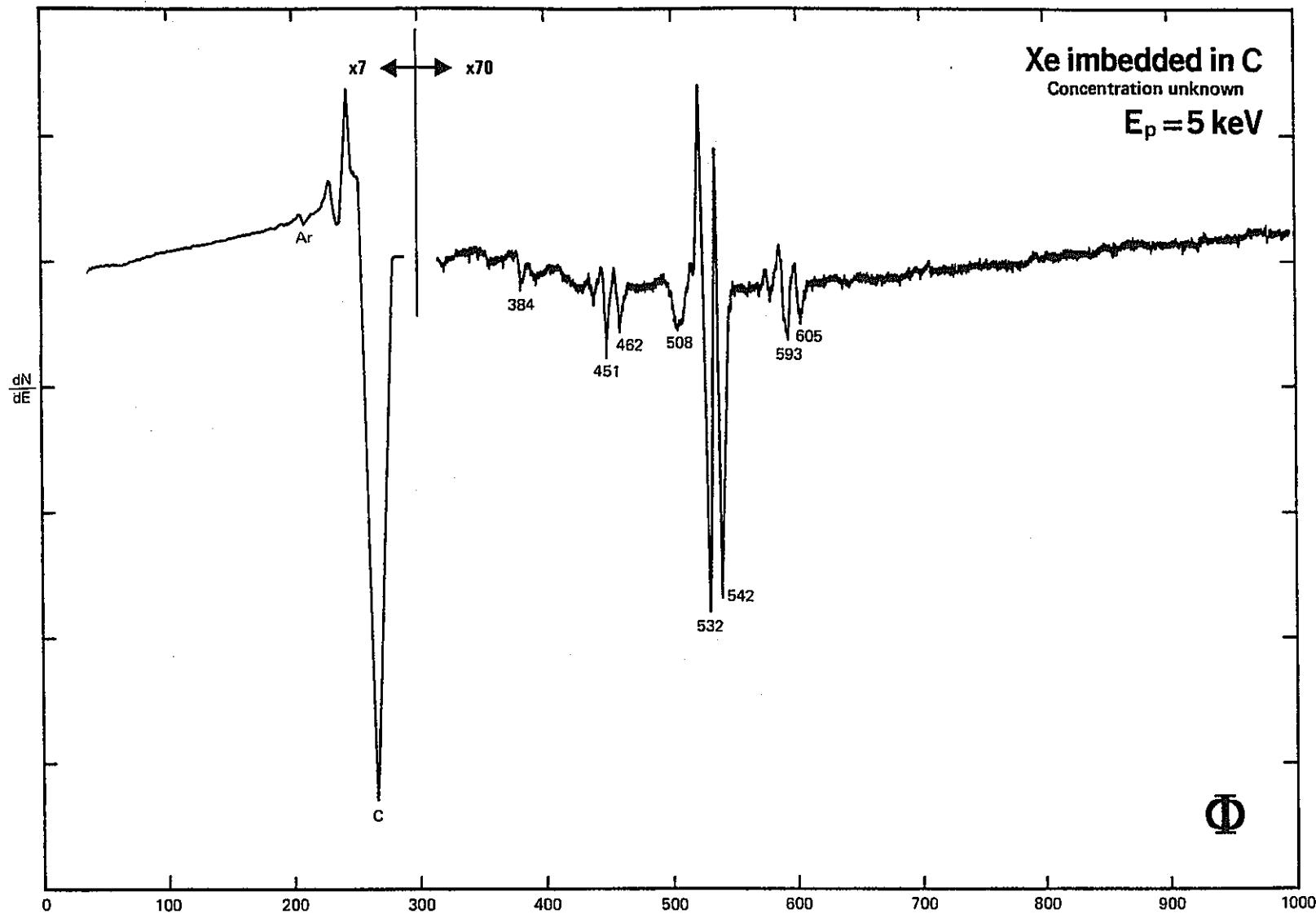


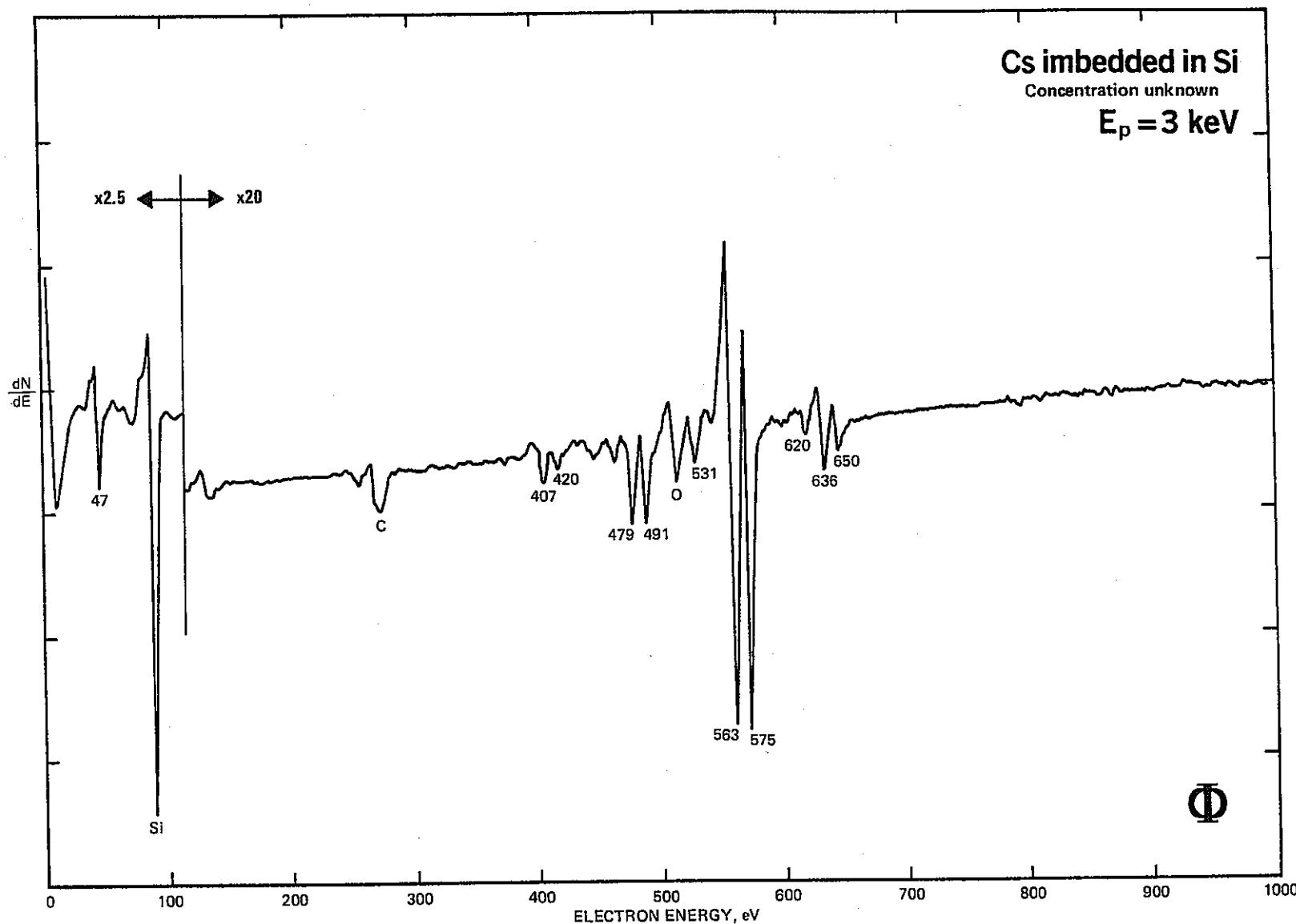


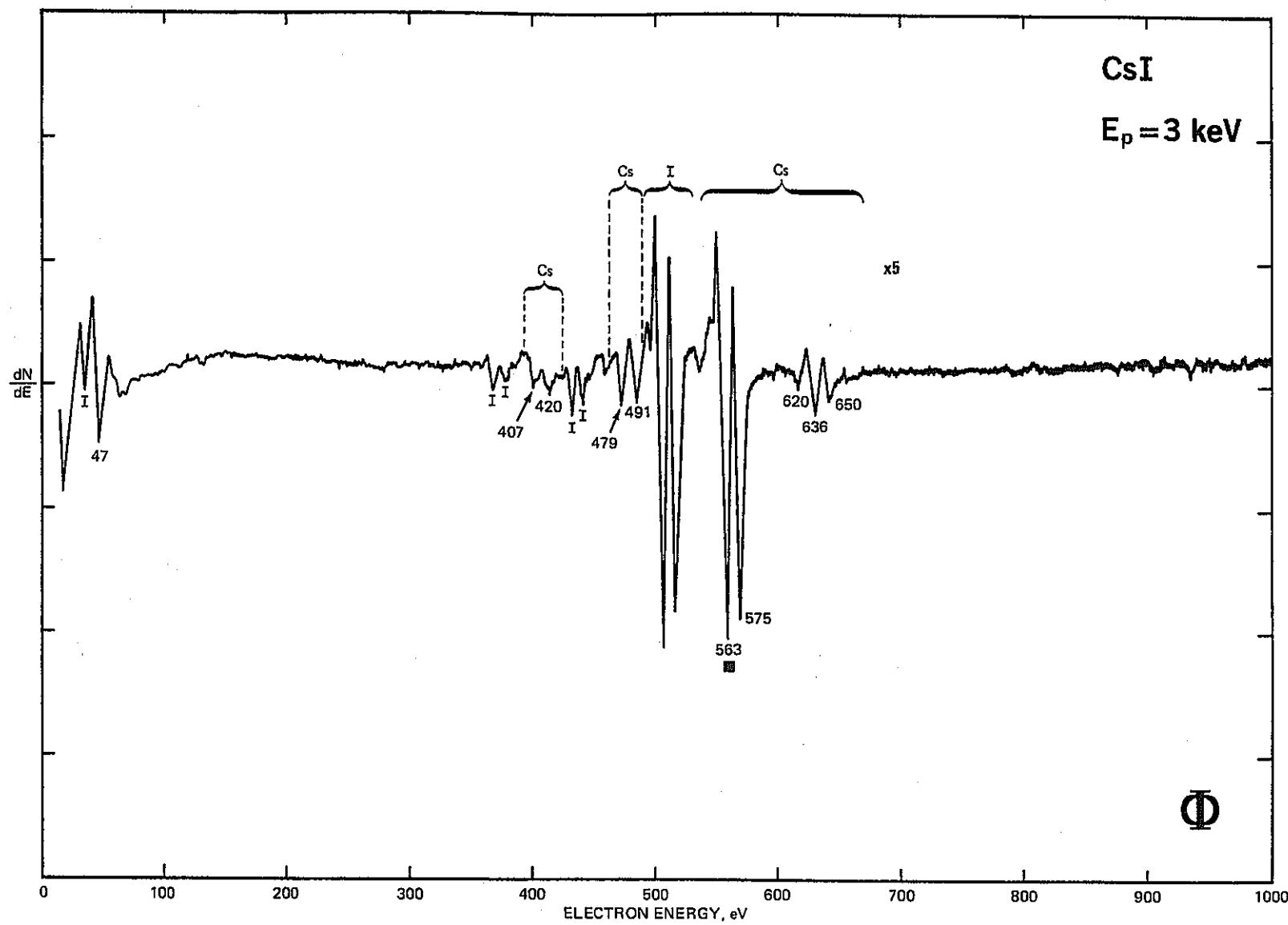


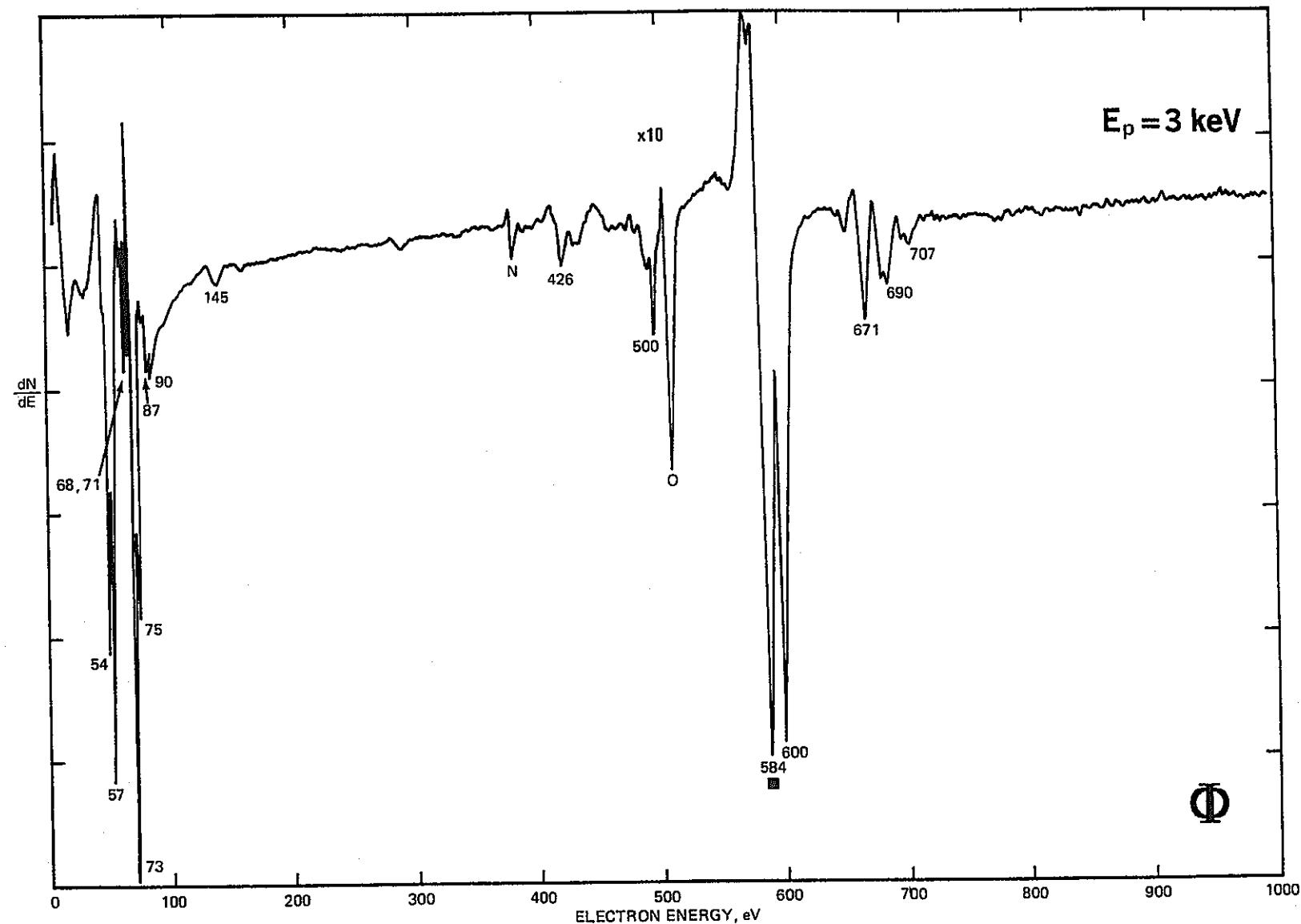


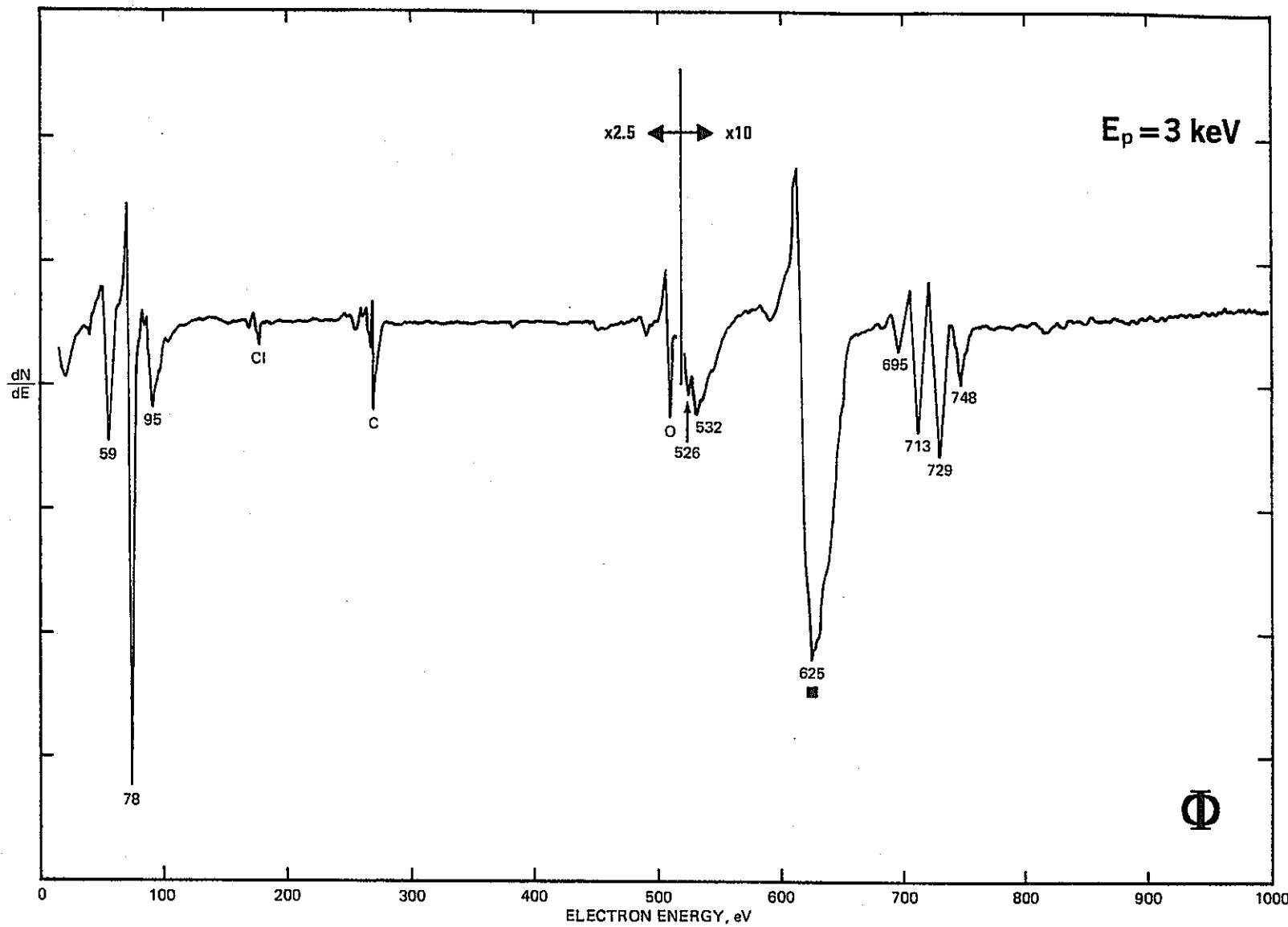


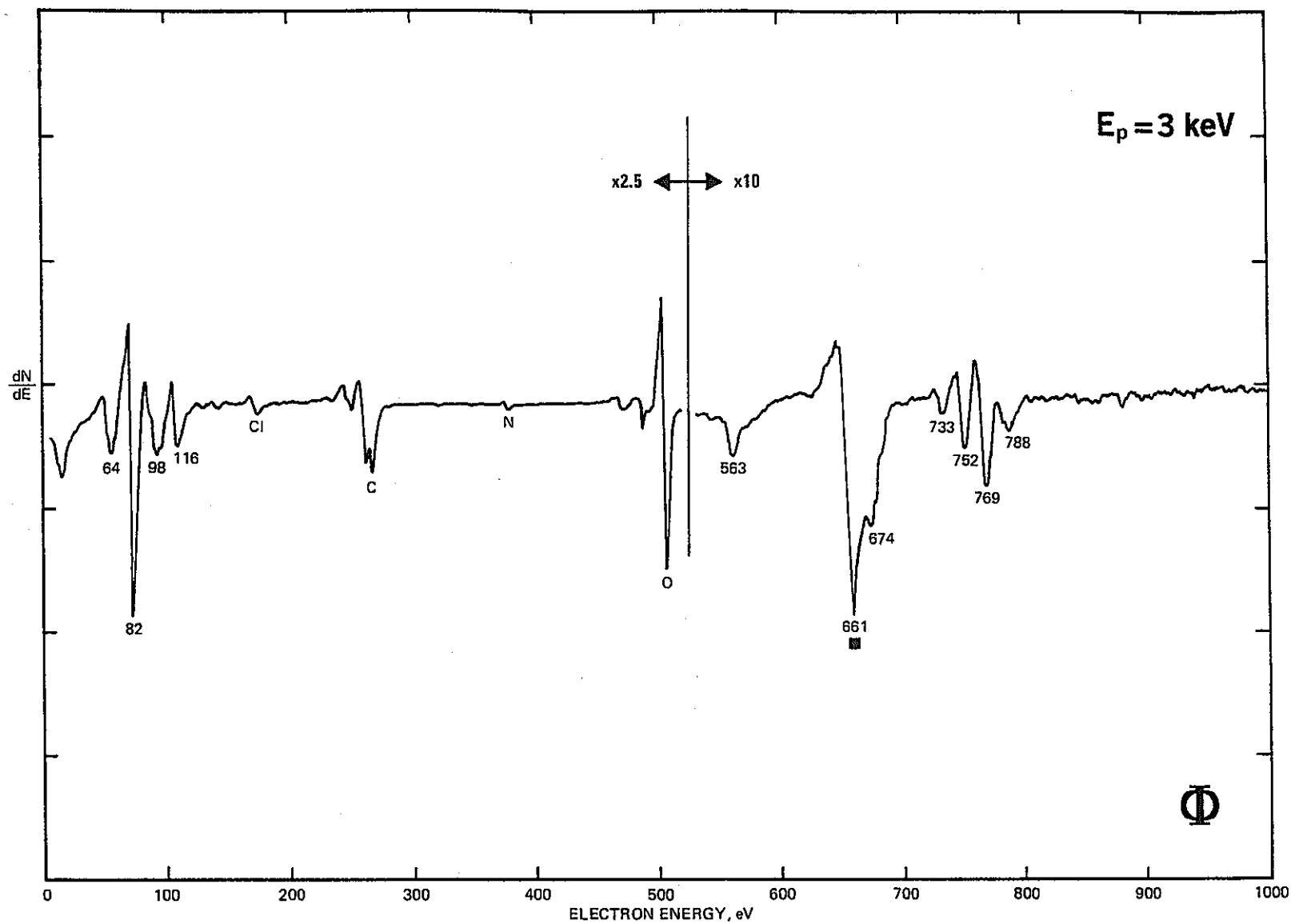




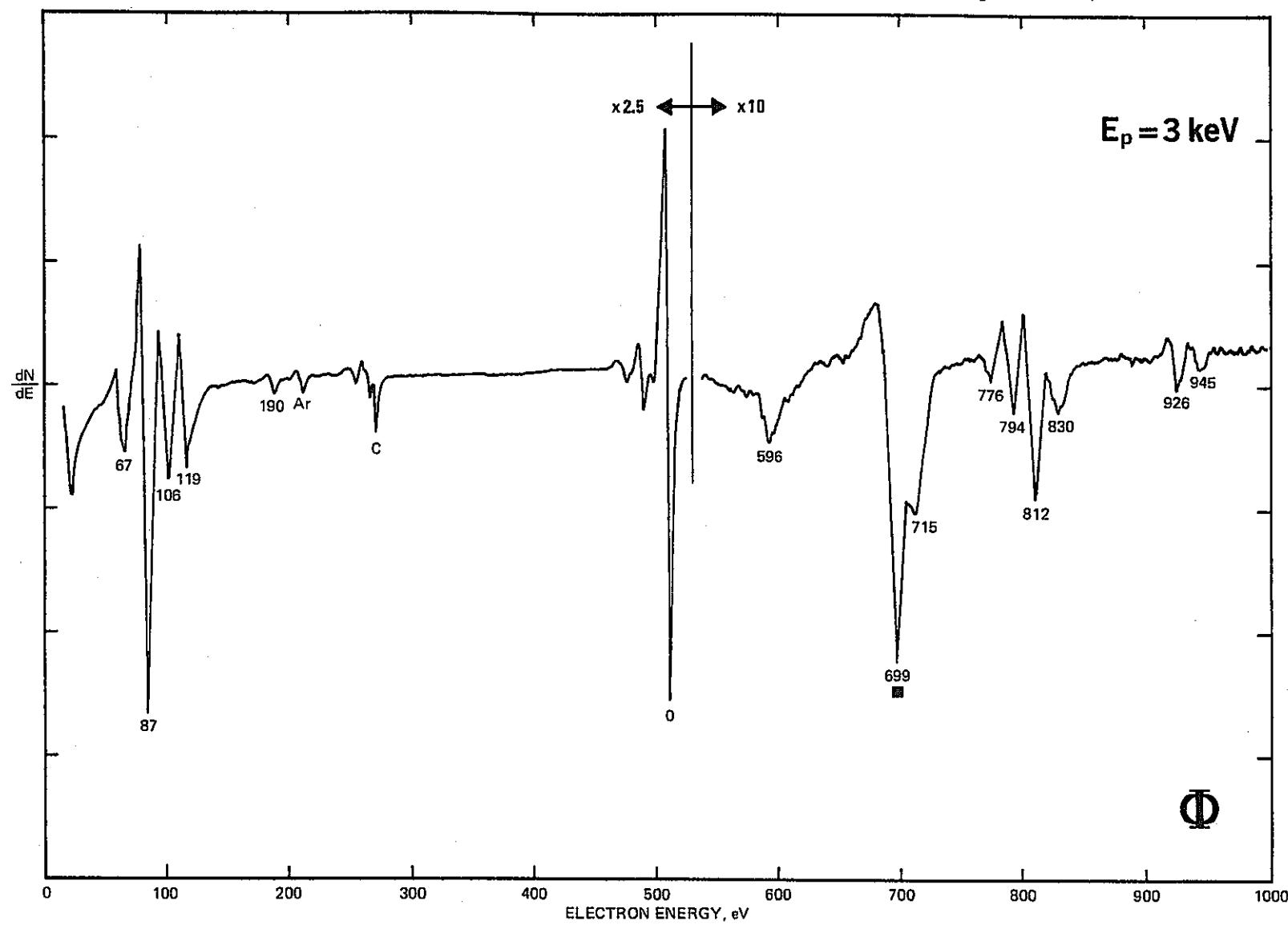


Barium, Ba Atomic Number 56



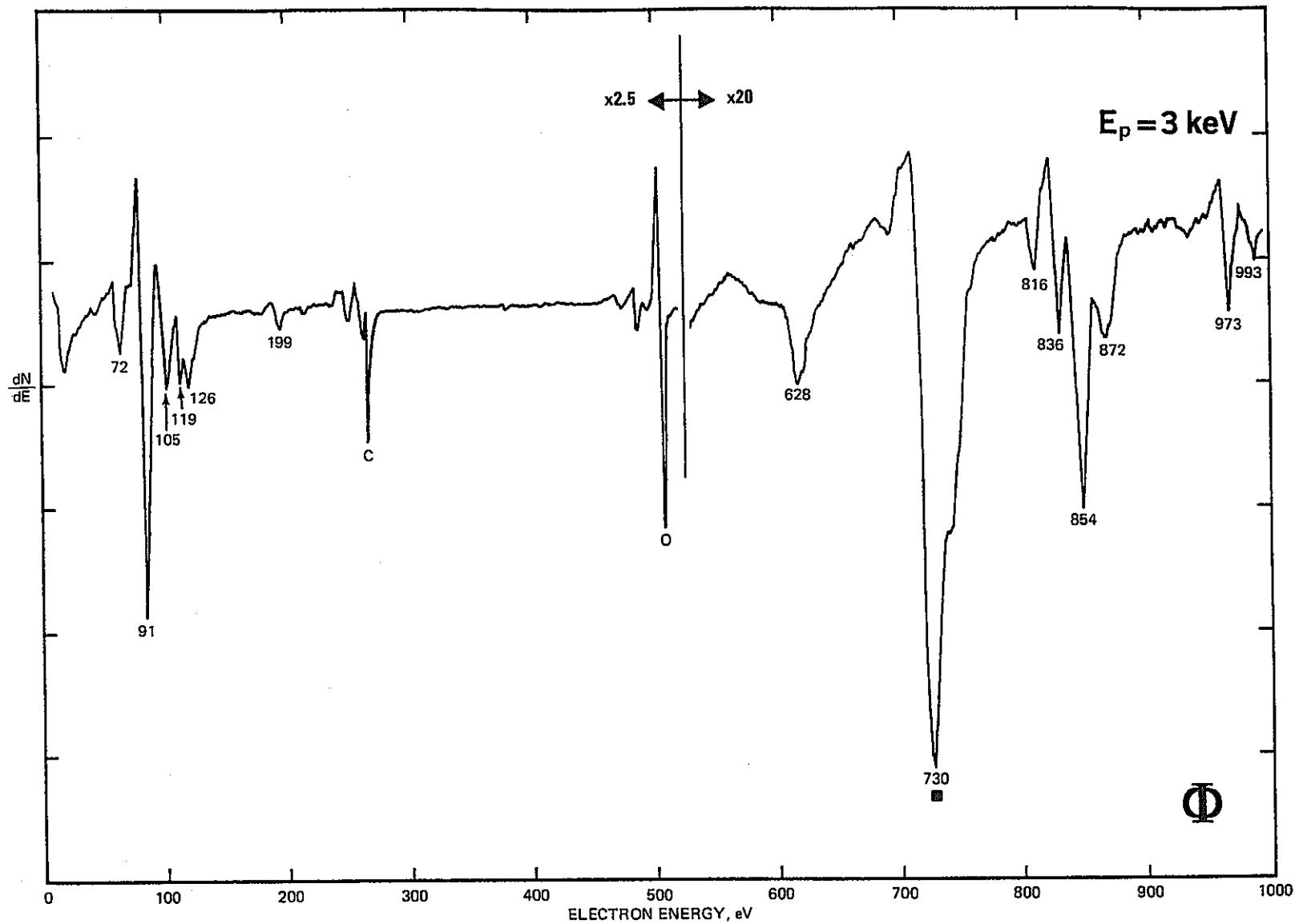


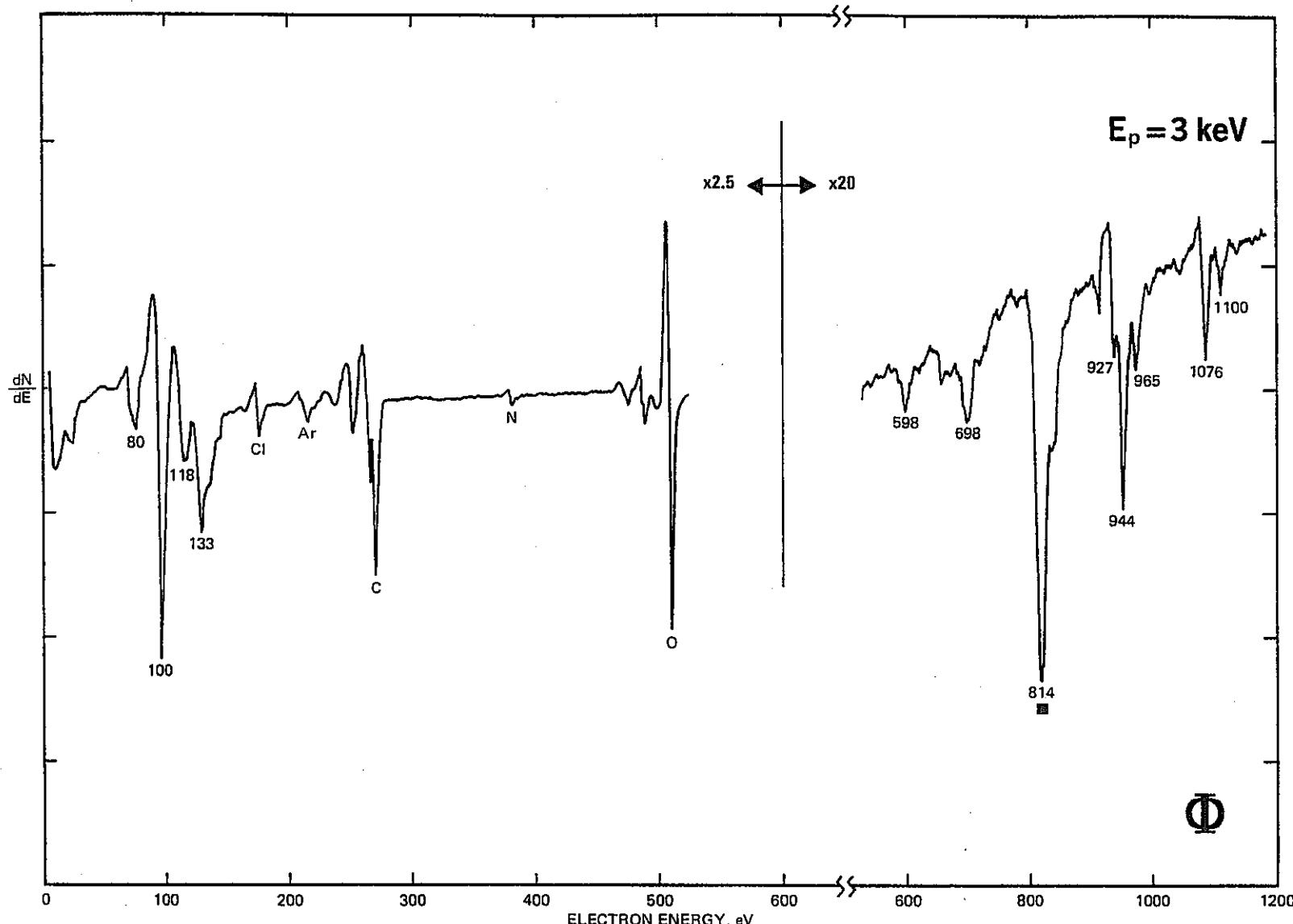
Praseodymium, Pr Atomic Number 59

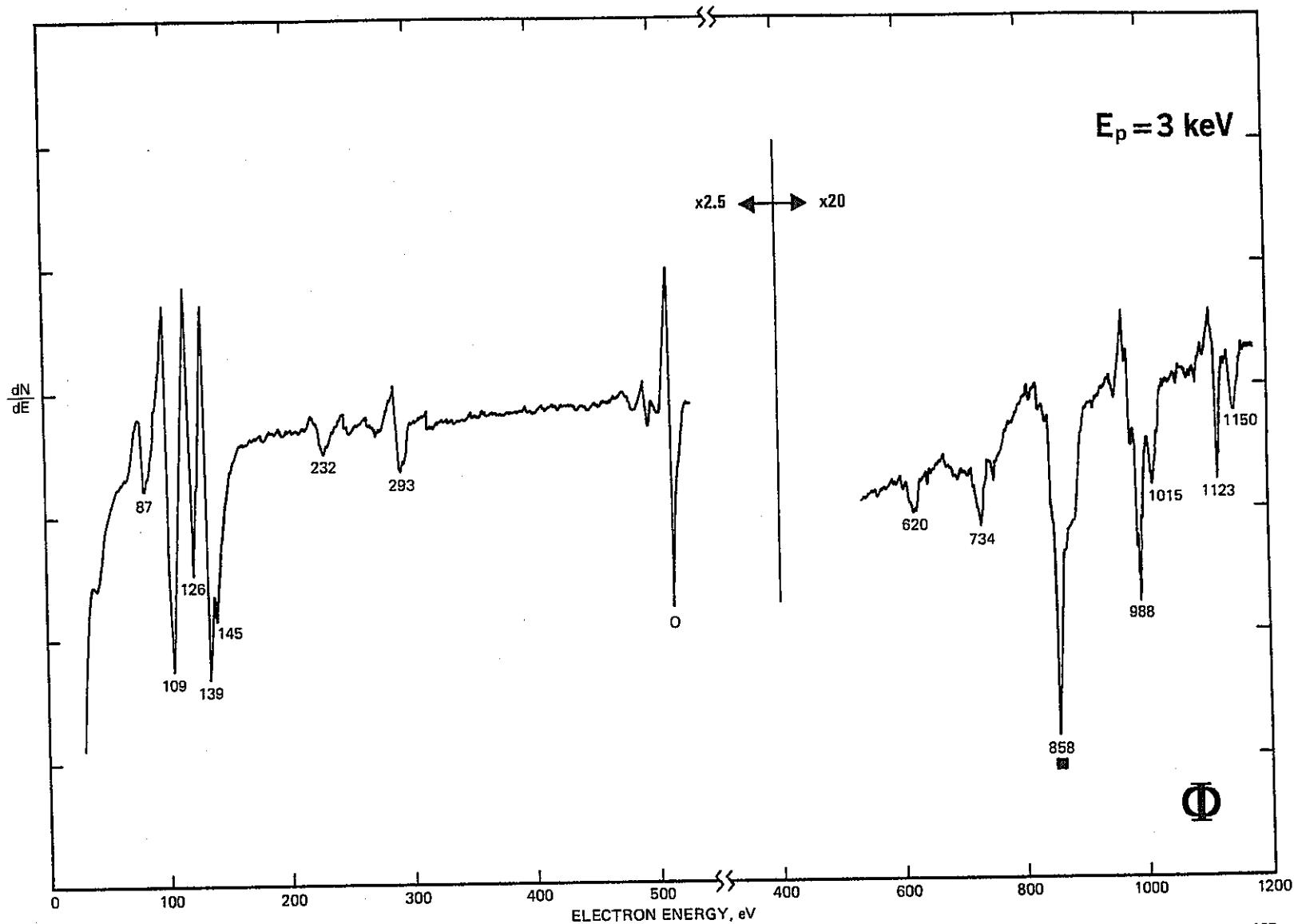


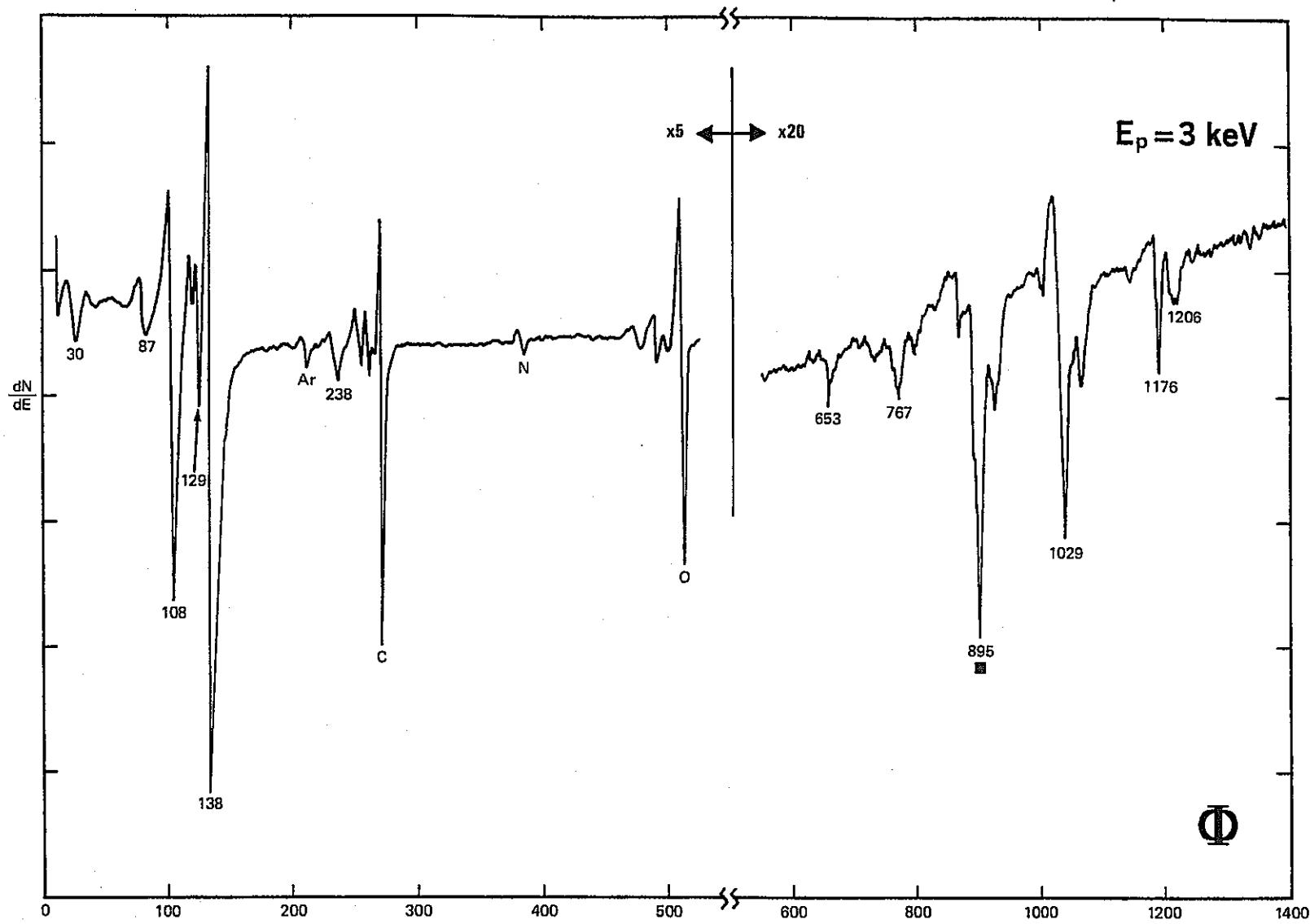
Neodymium, Nd

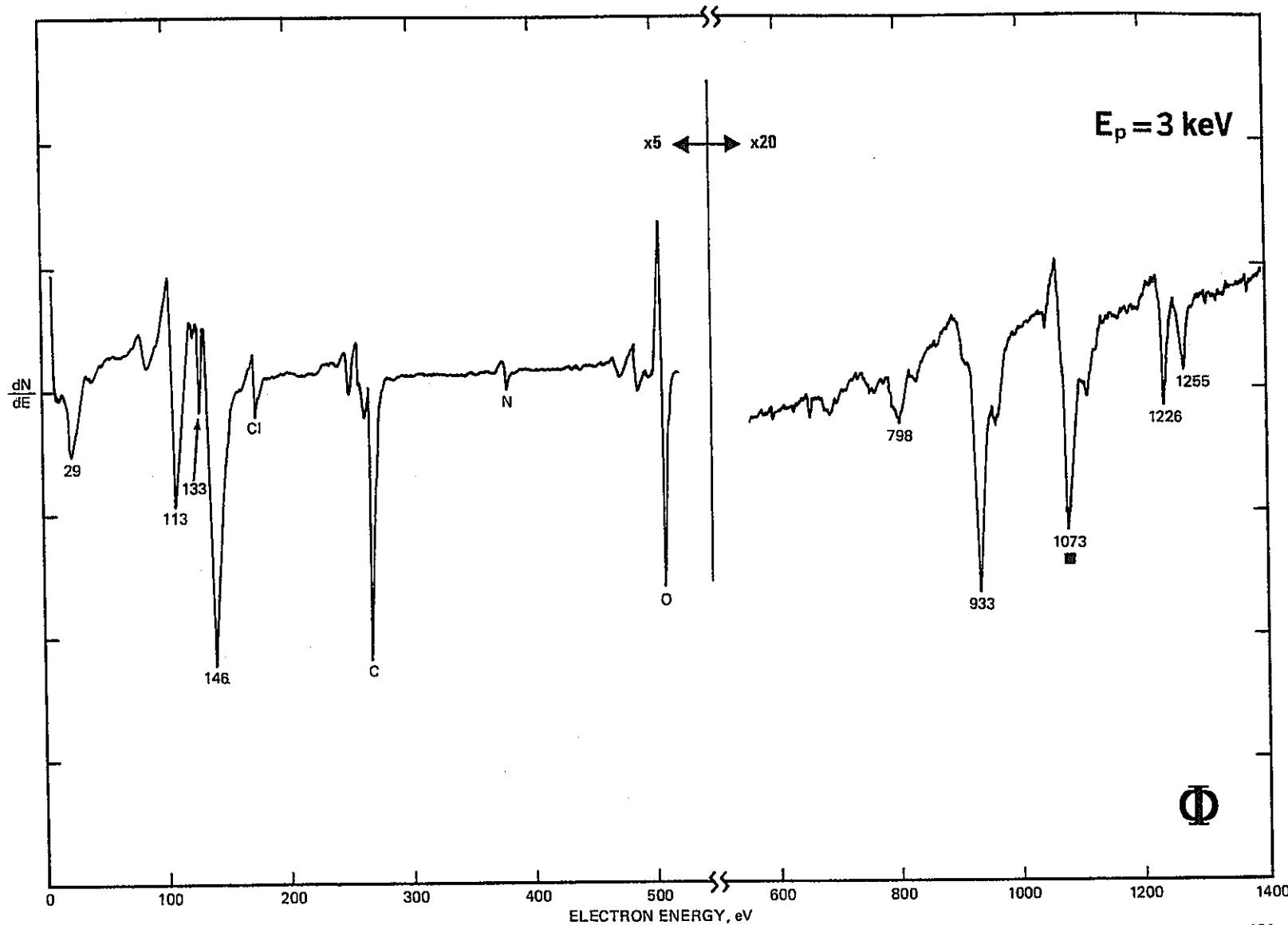
Atomic Number 60

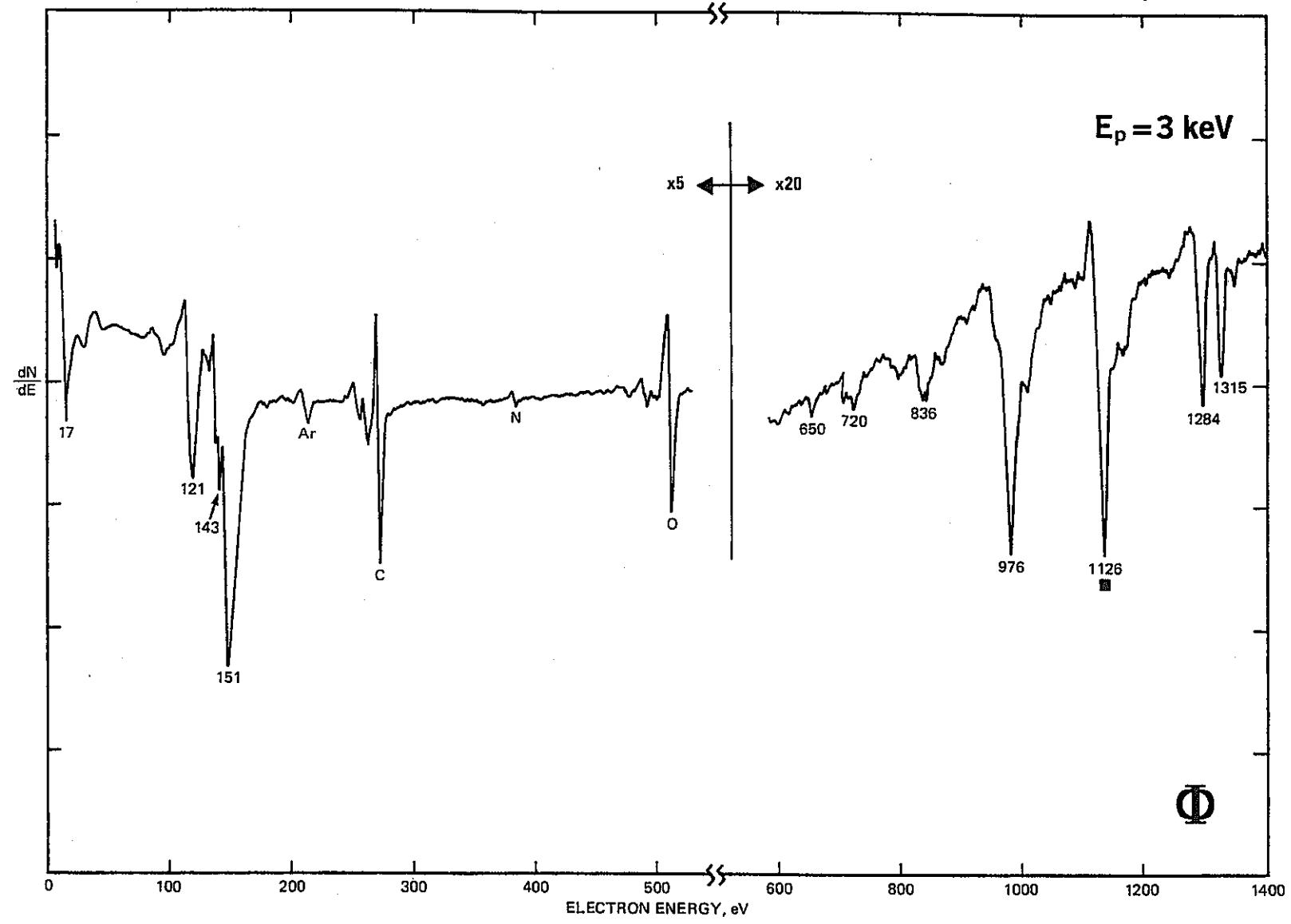


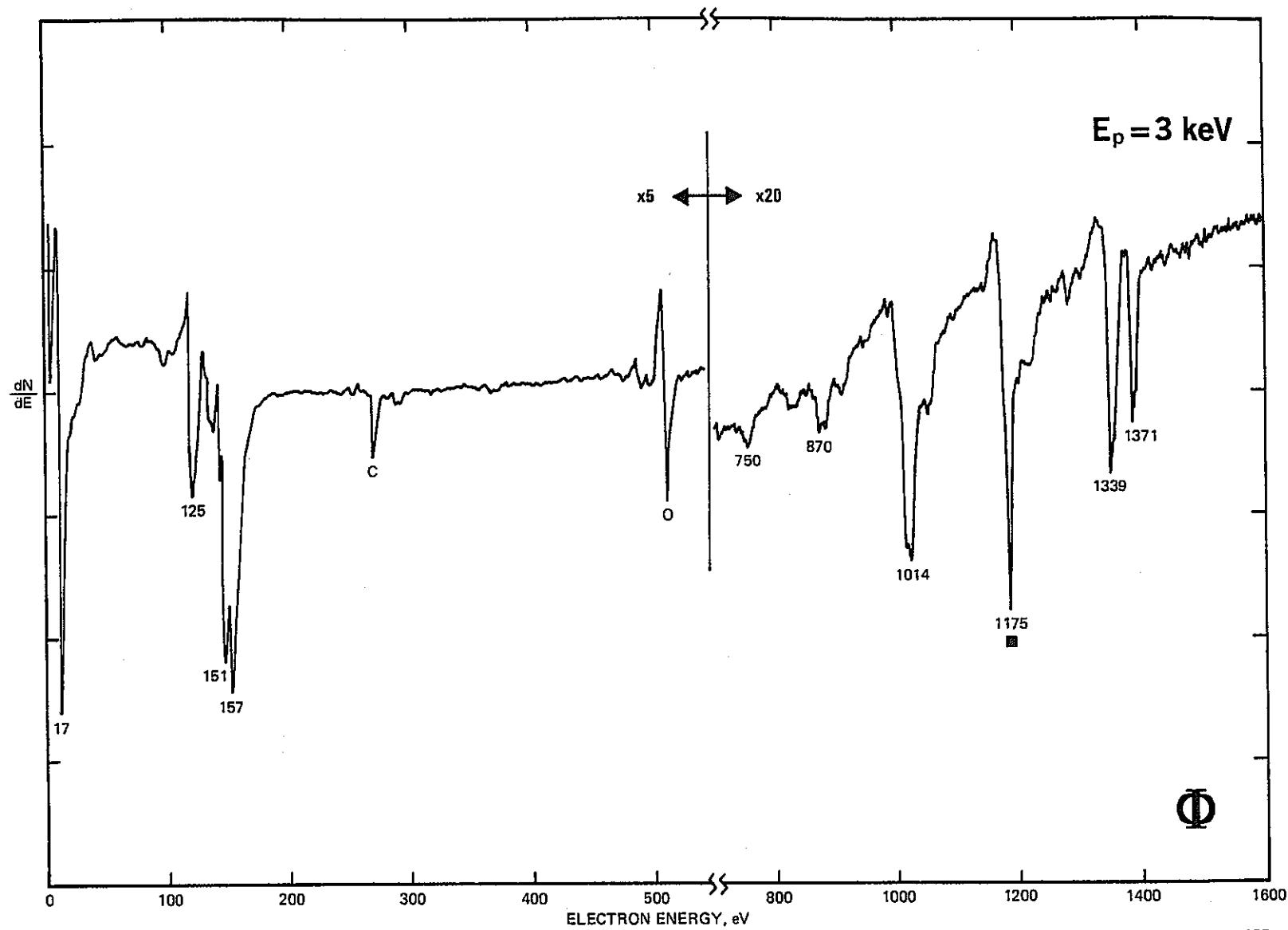


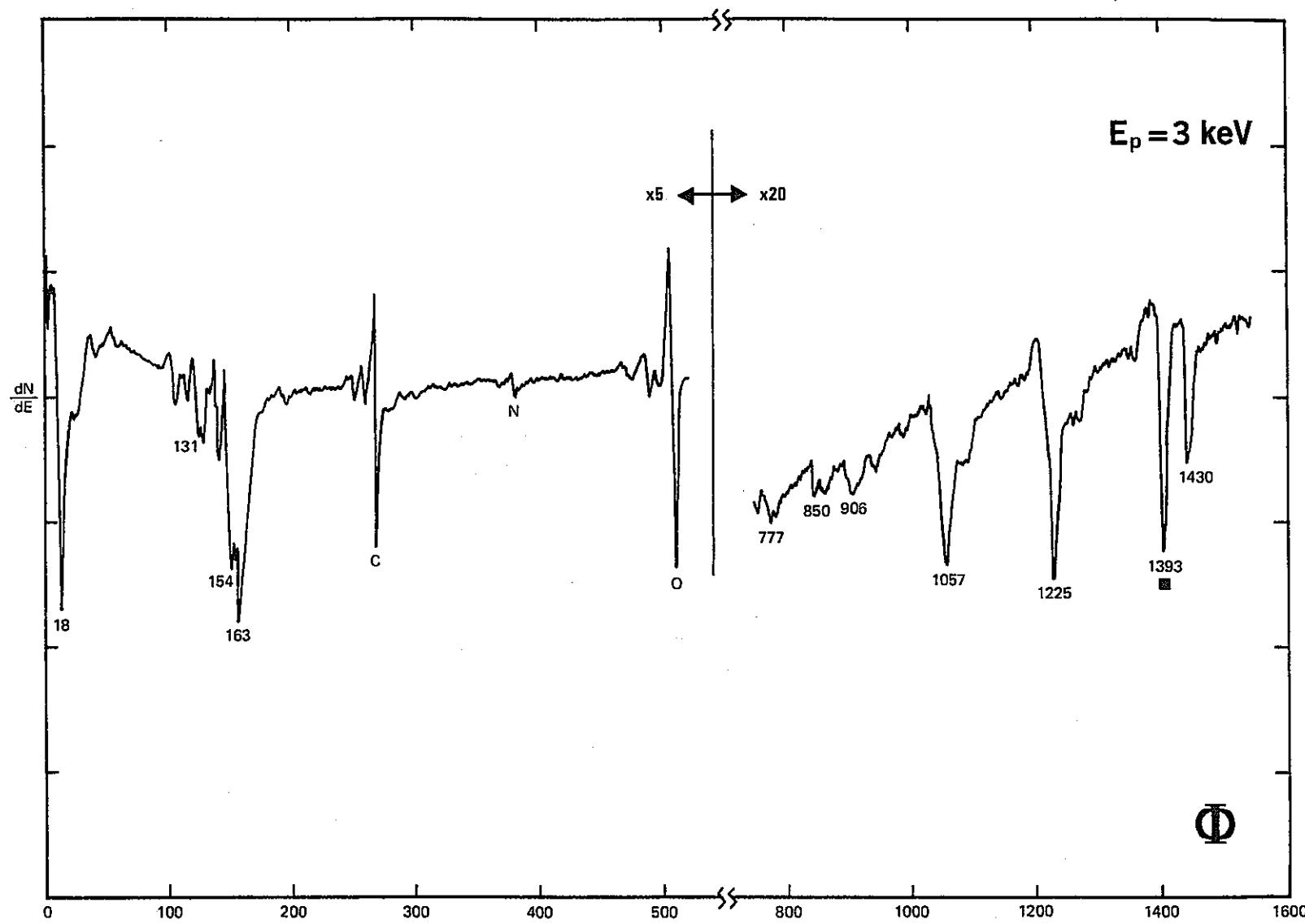


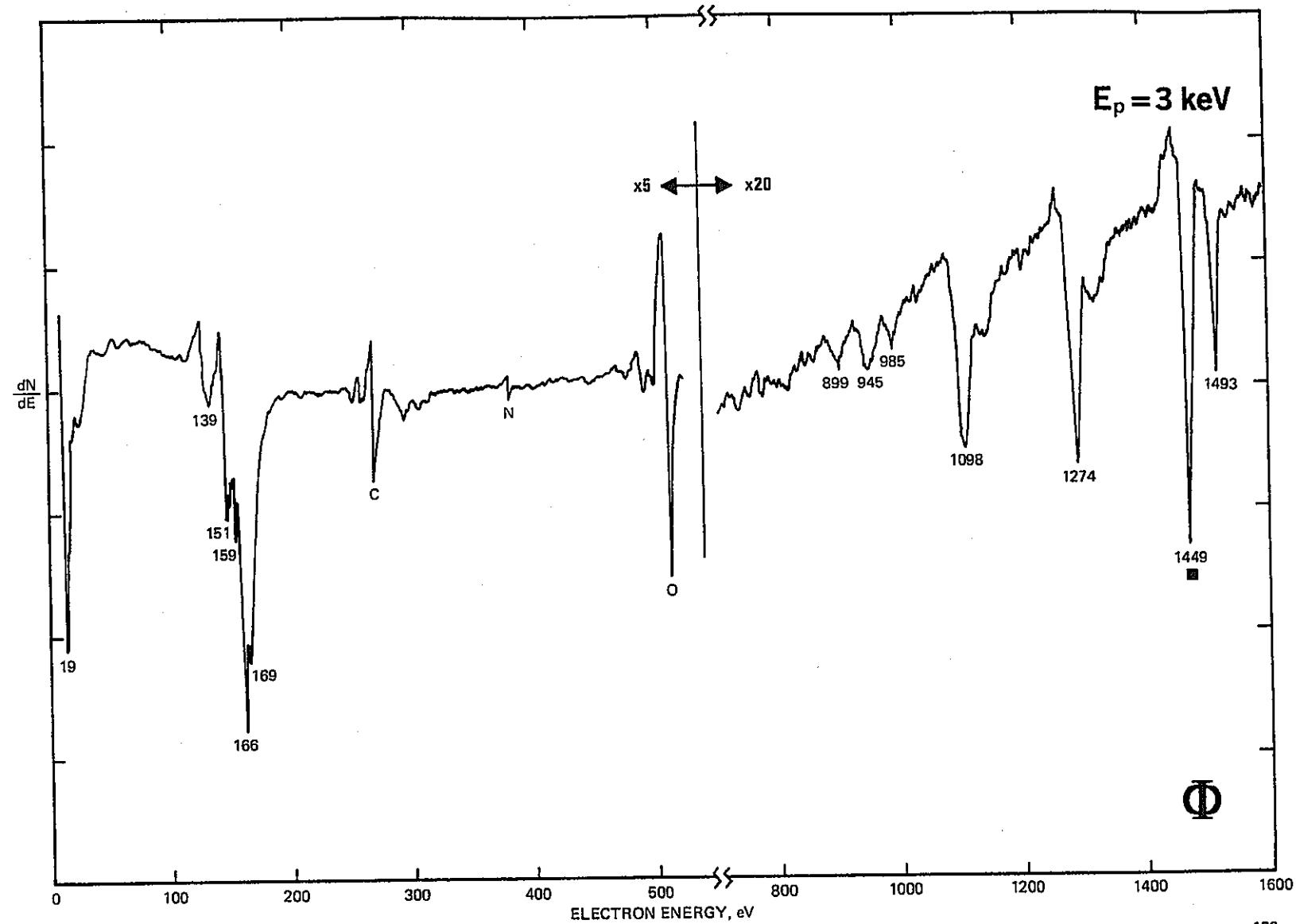


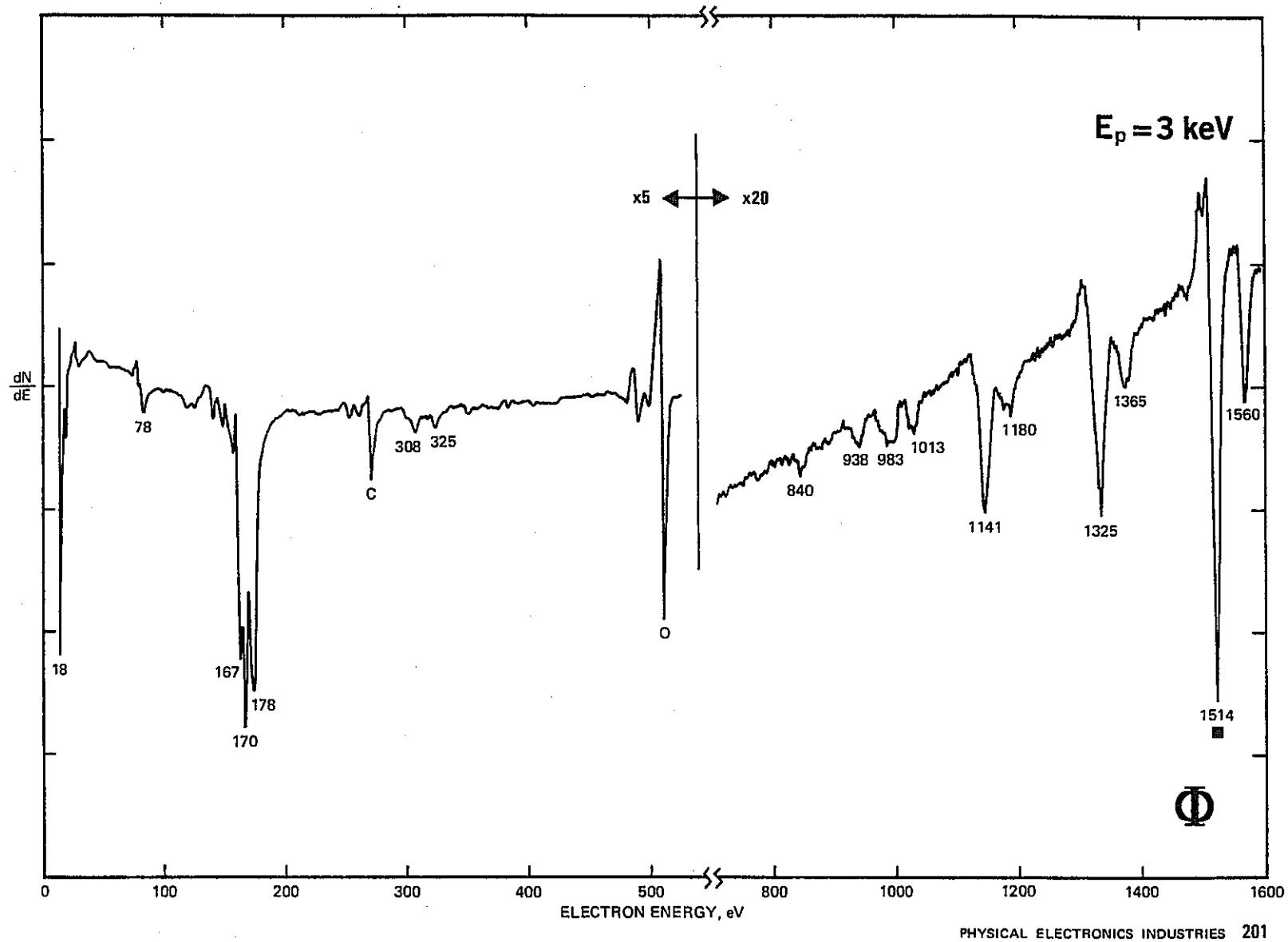




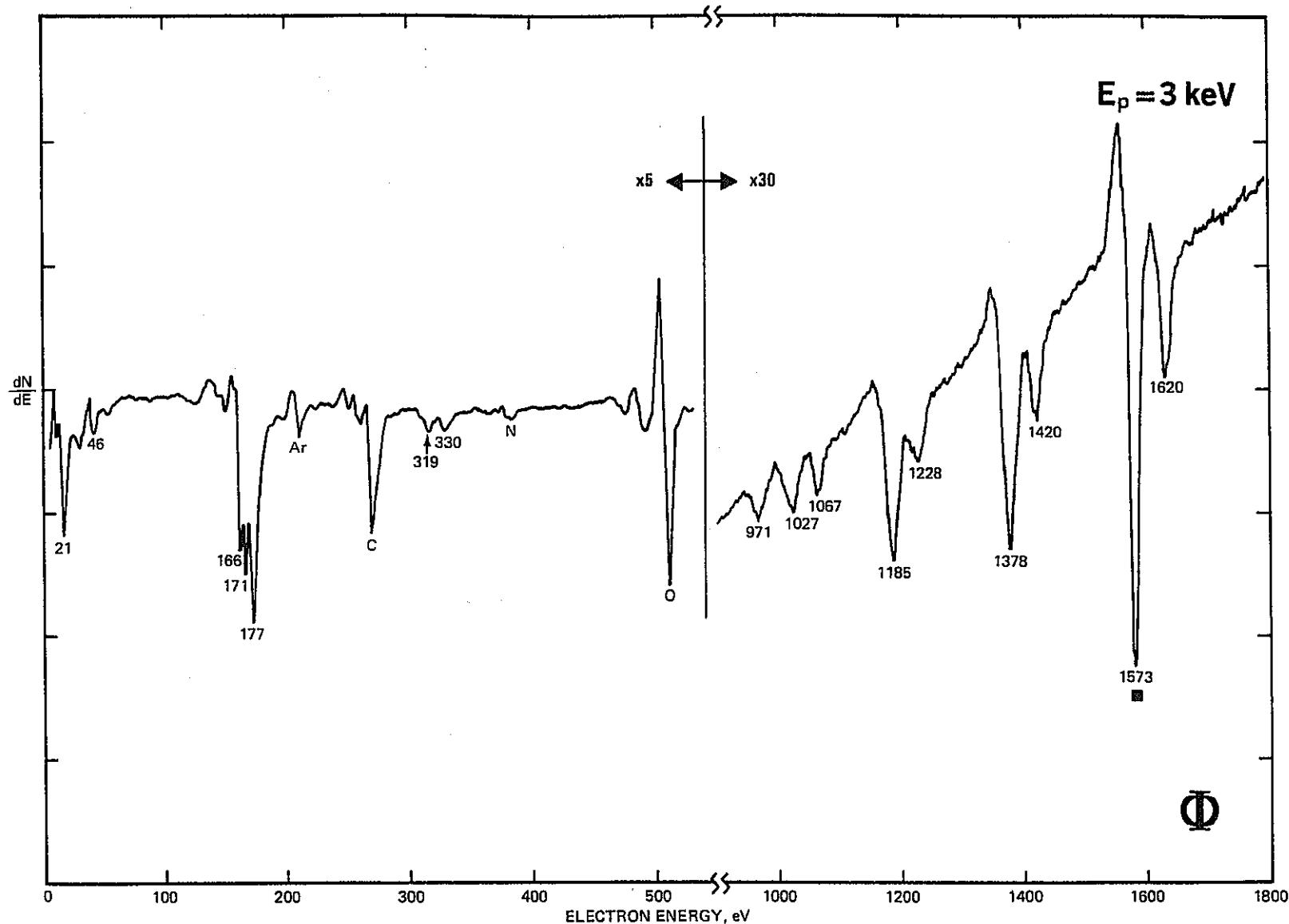


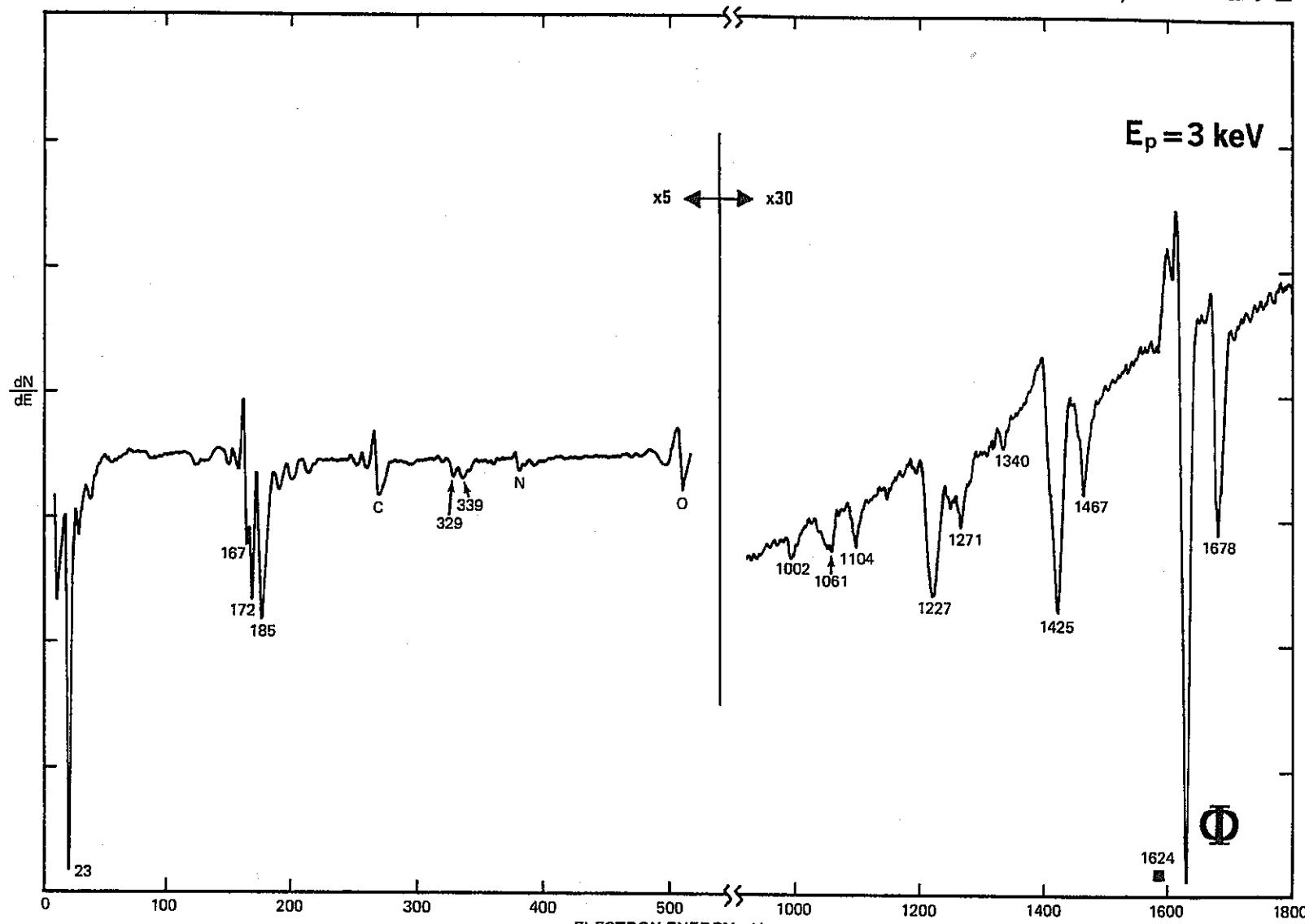


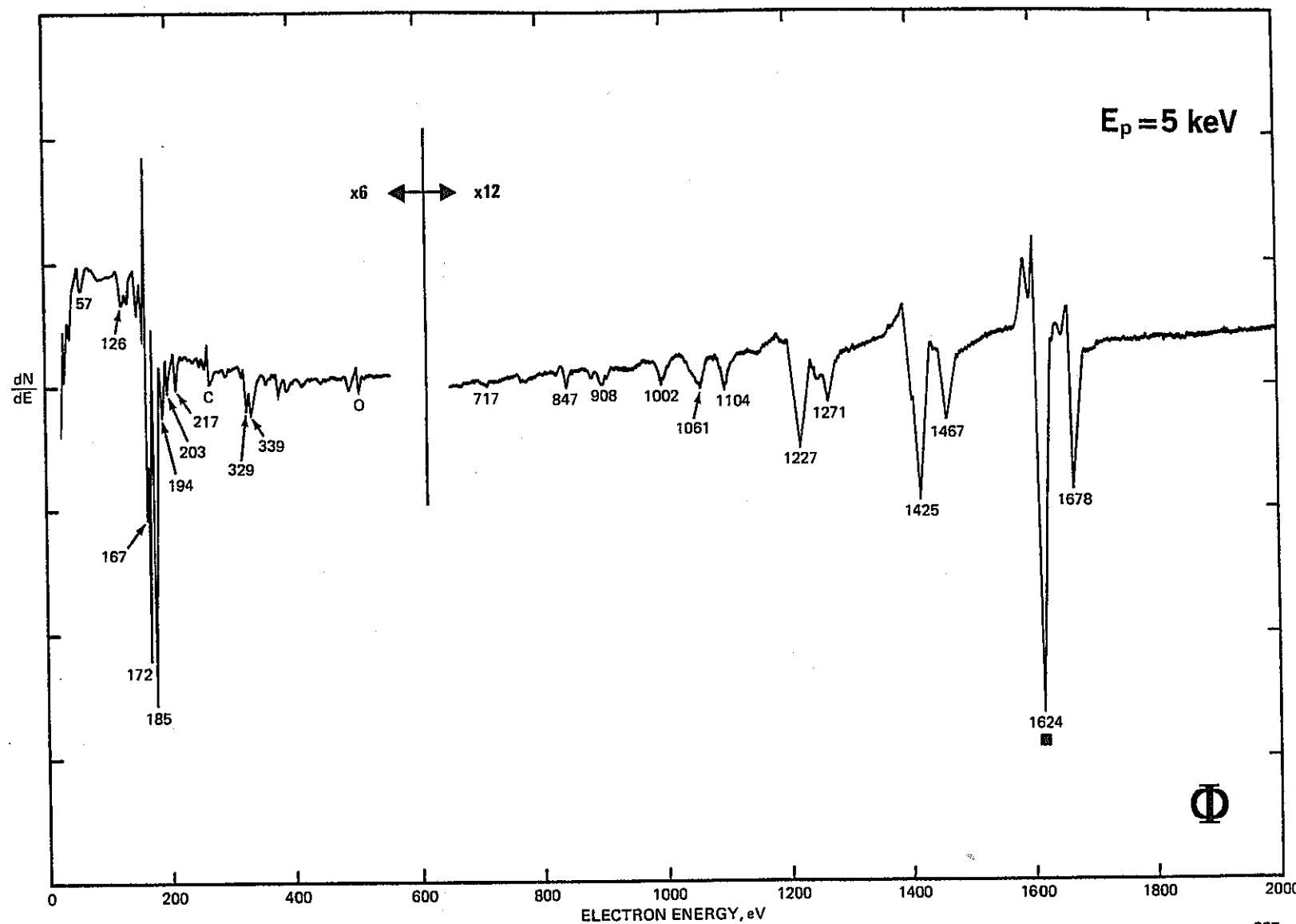
Thulium, Tm Atomic Number 69

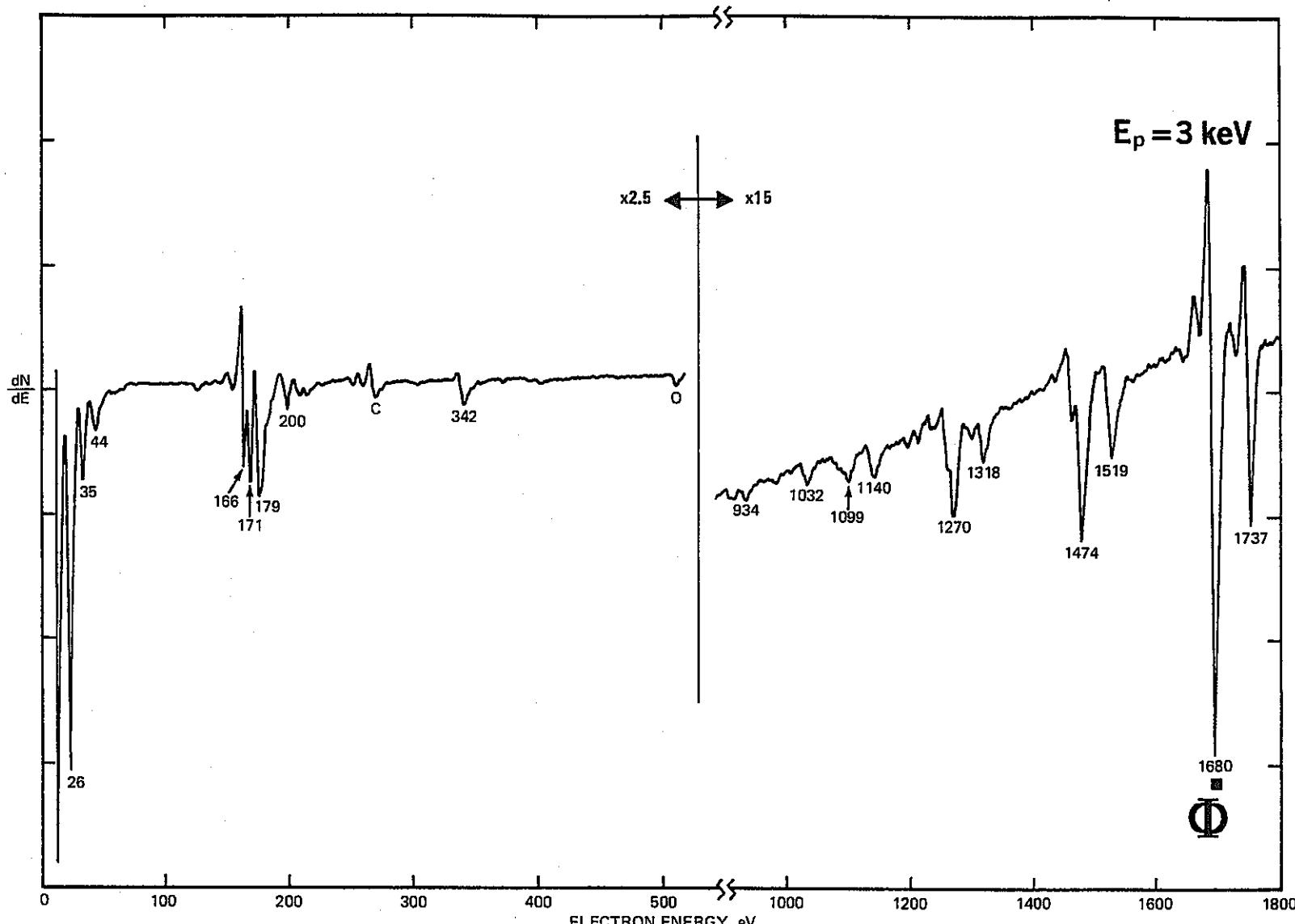


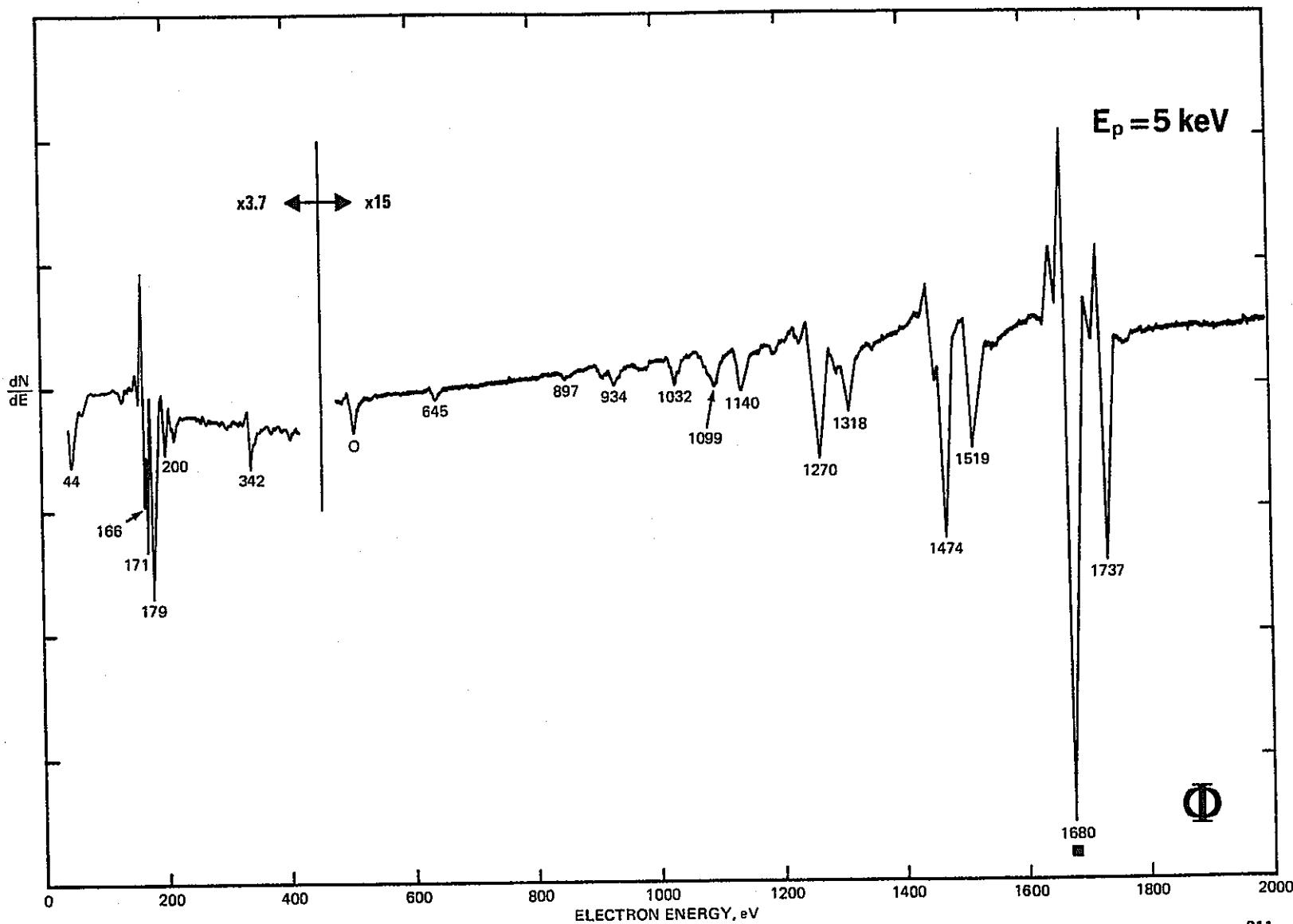
Lutetium, Lu Atomic Number 71

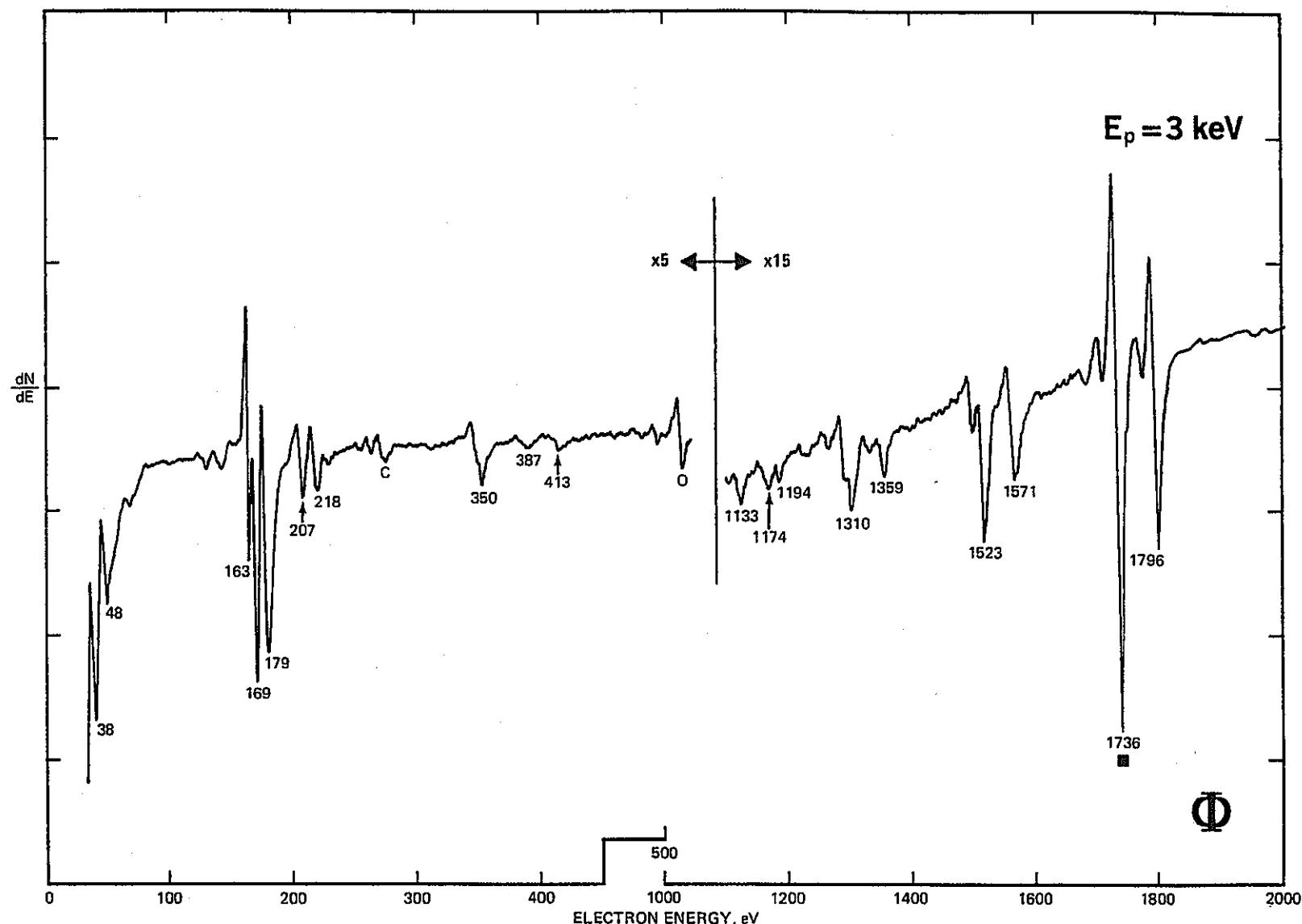


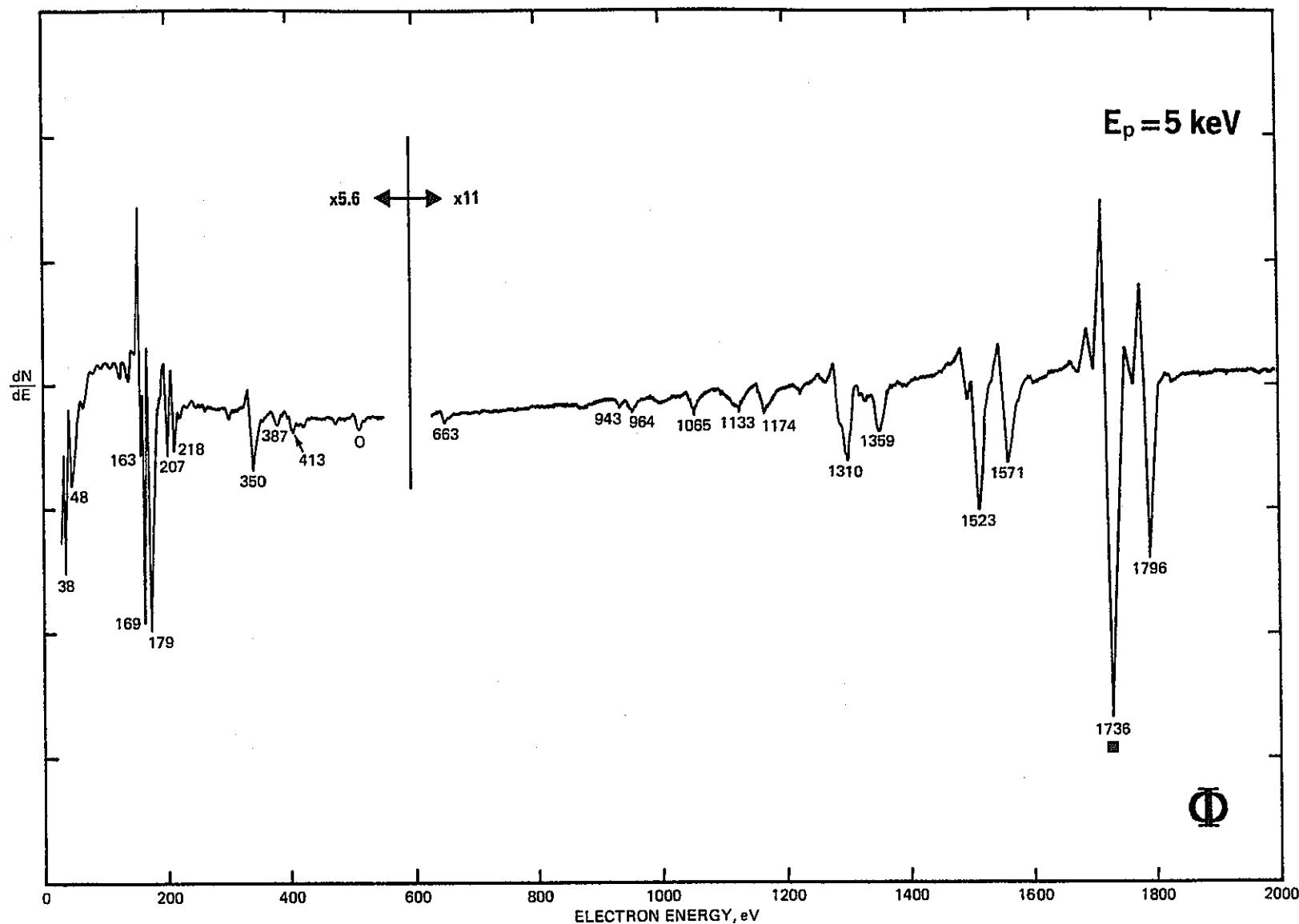




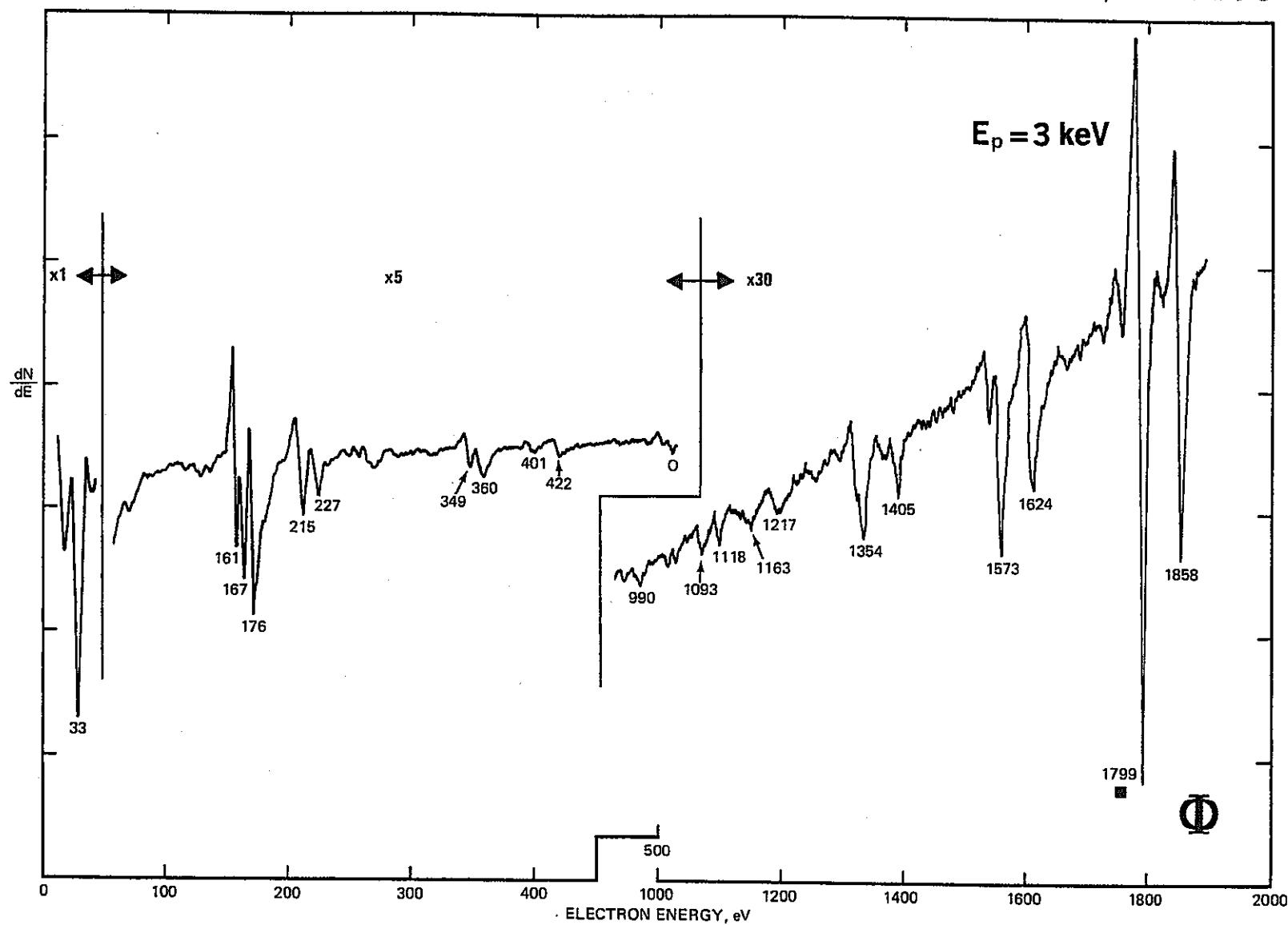


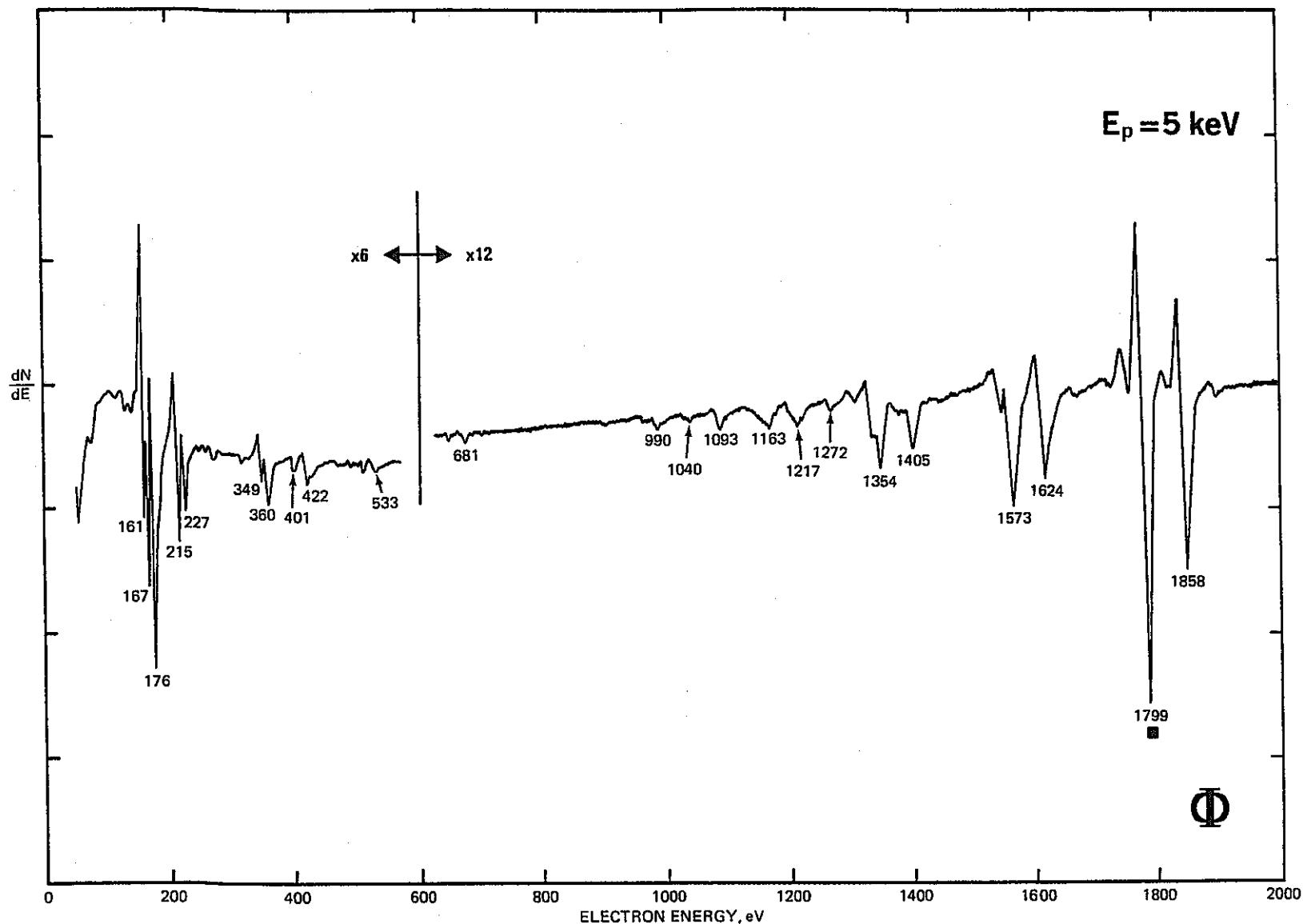


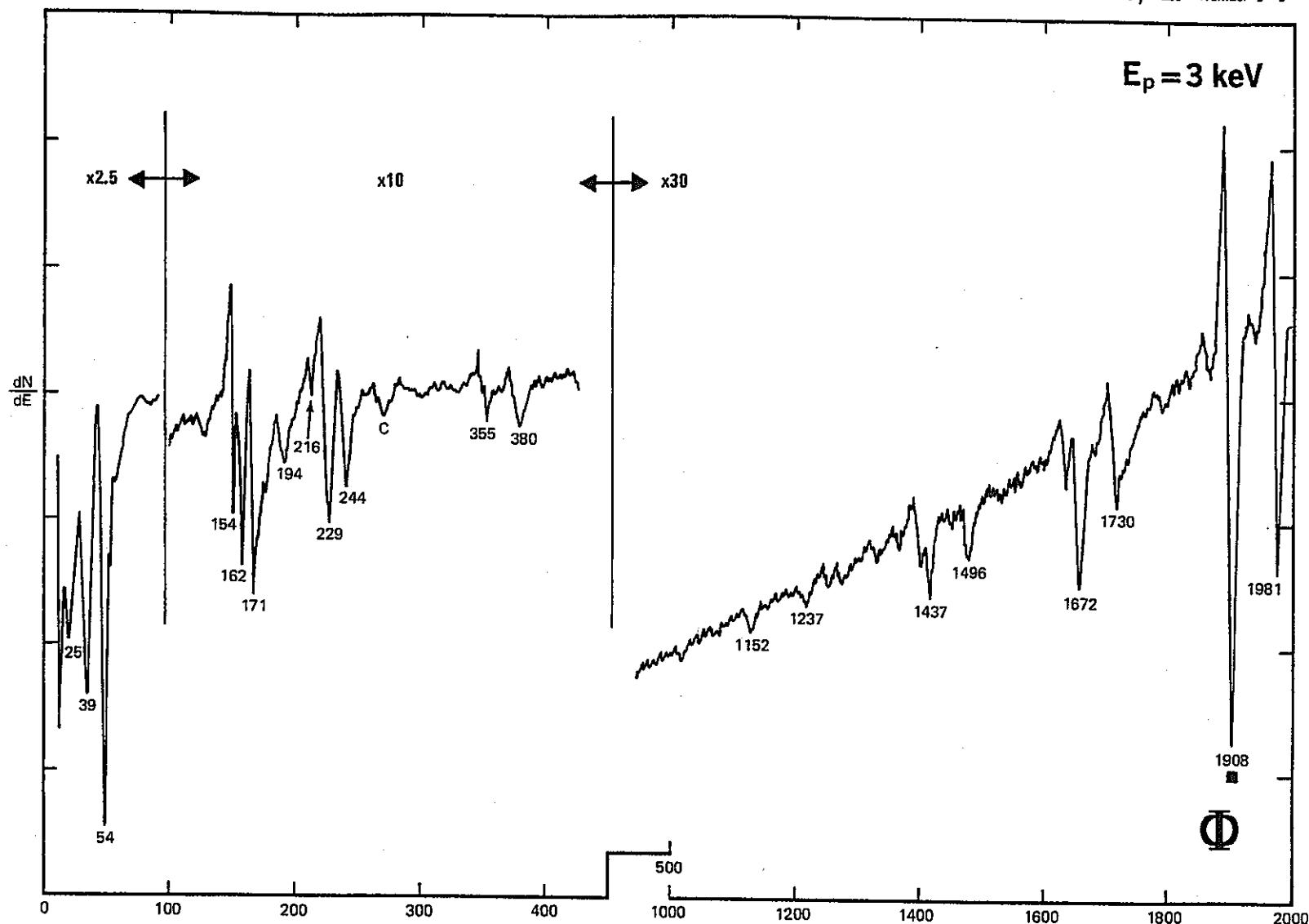


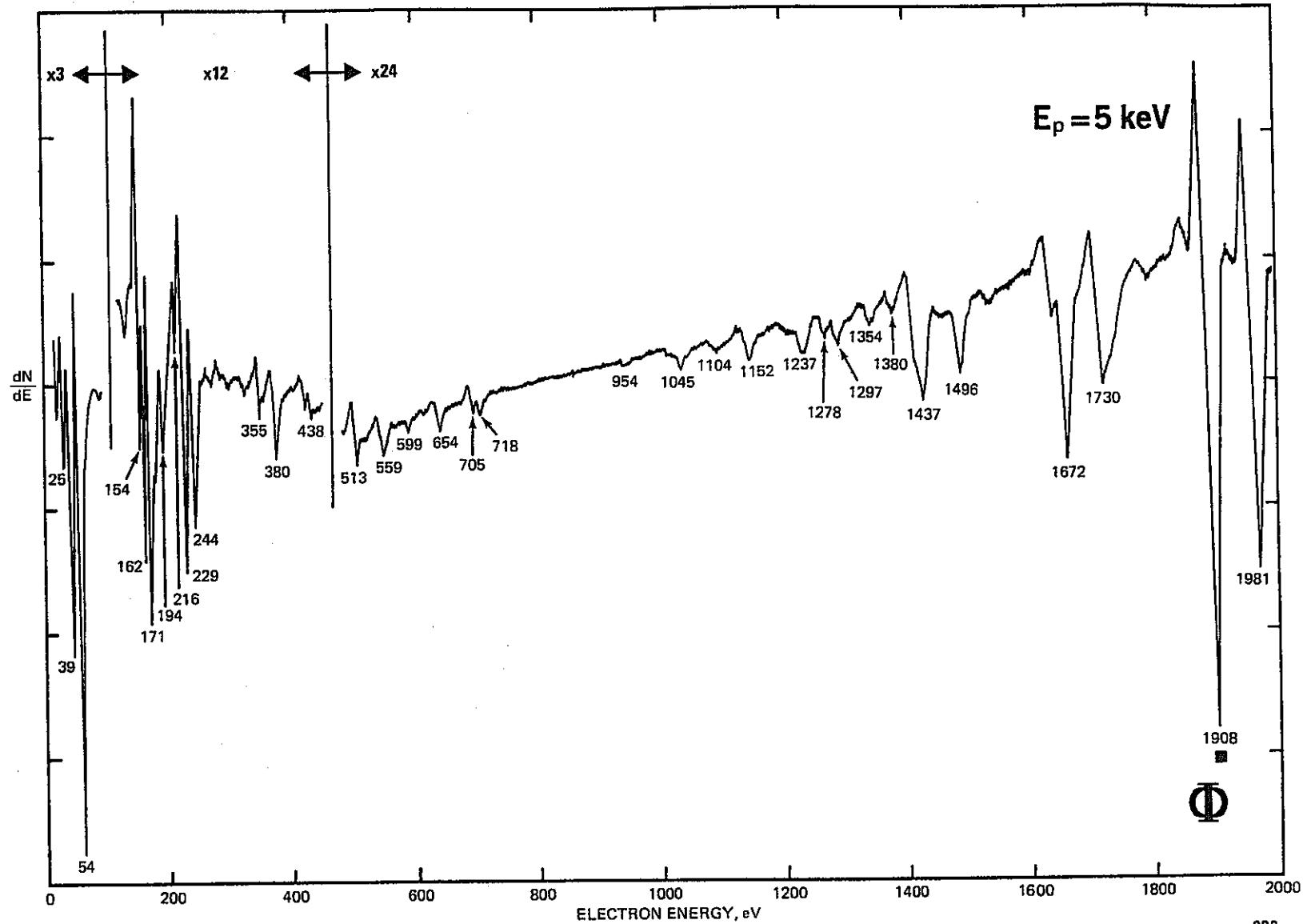


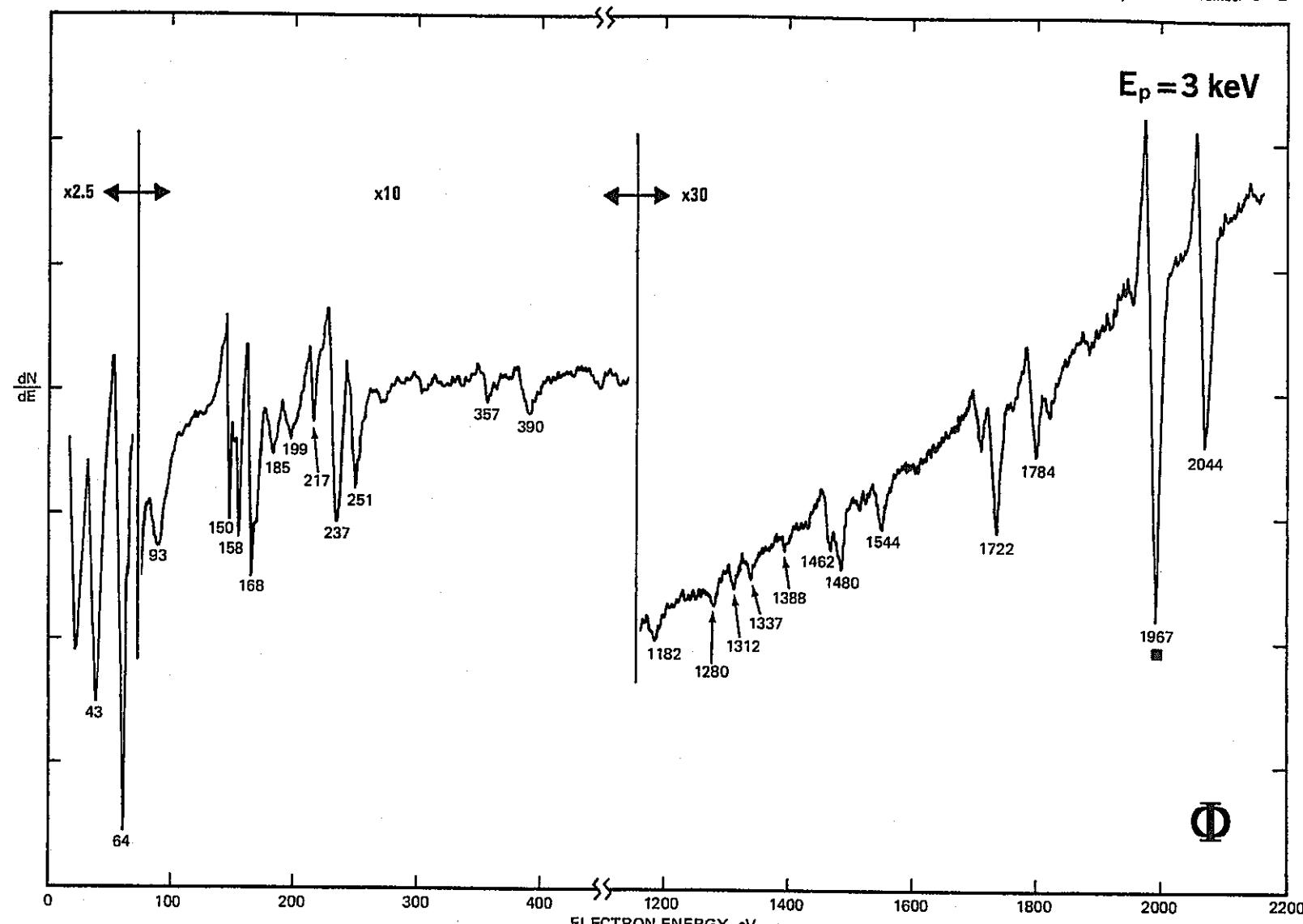
- 140 -

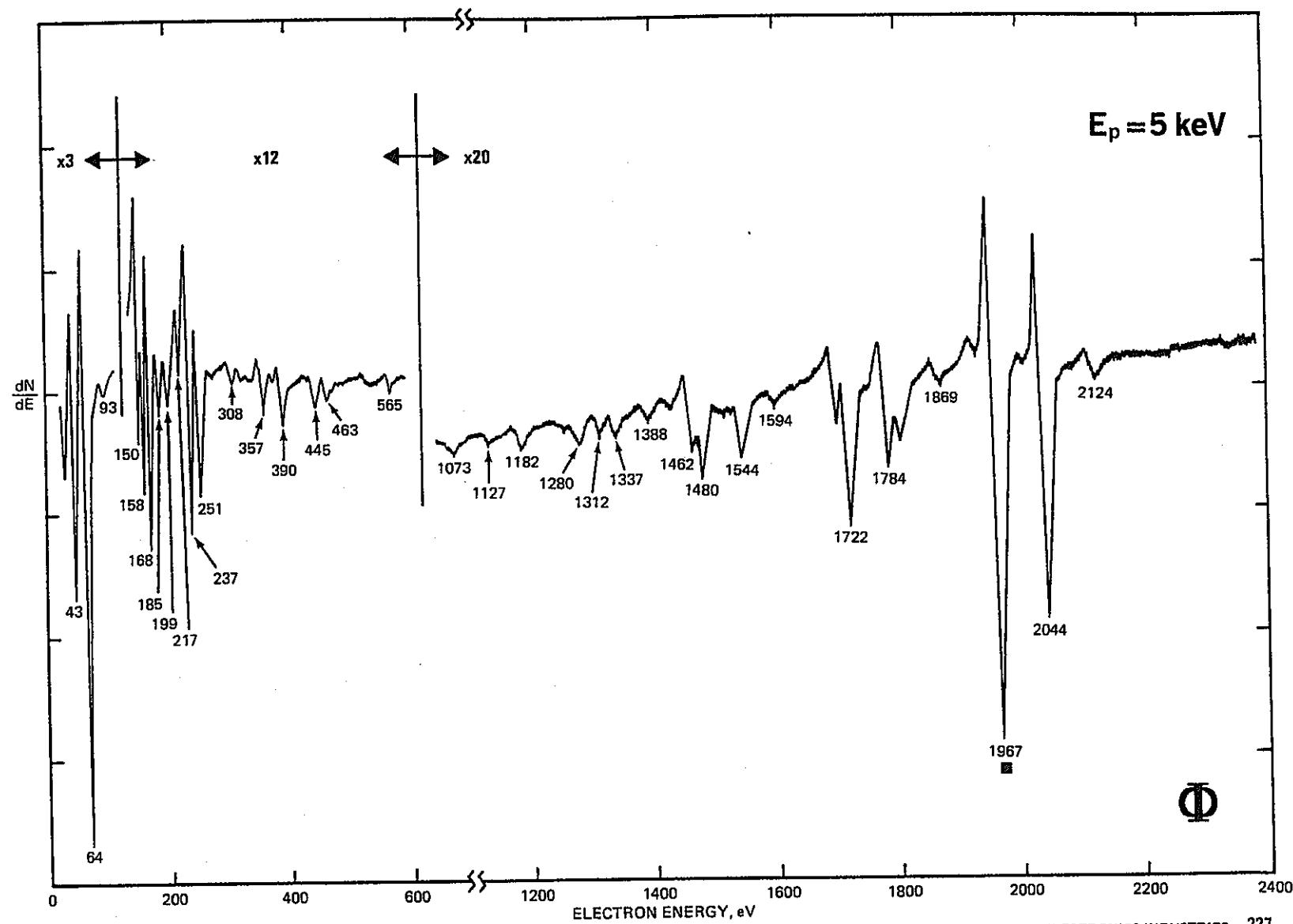


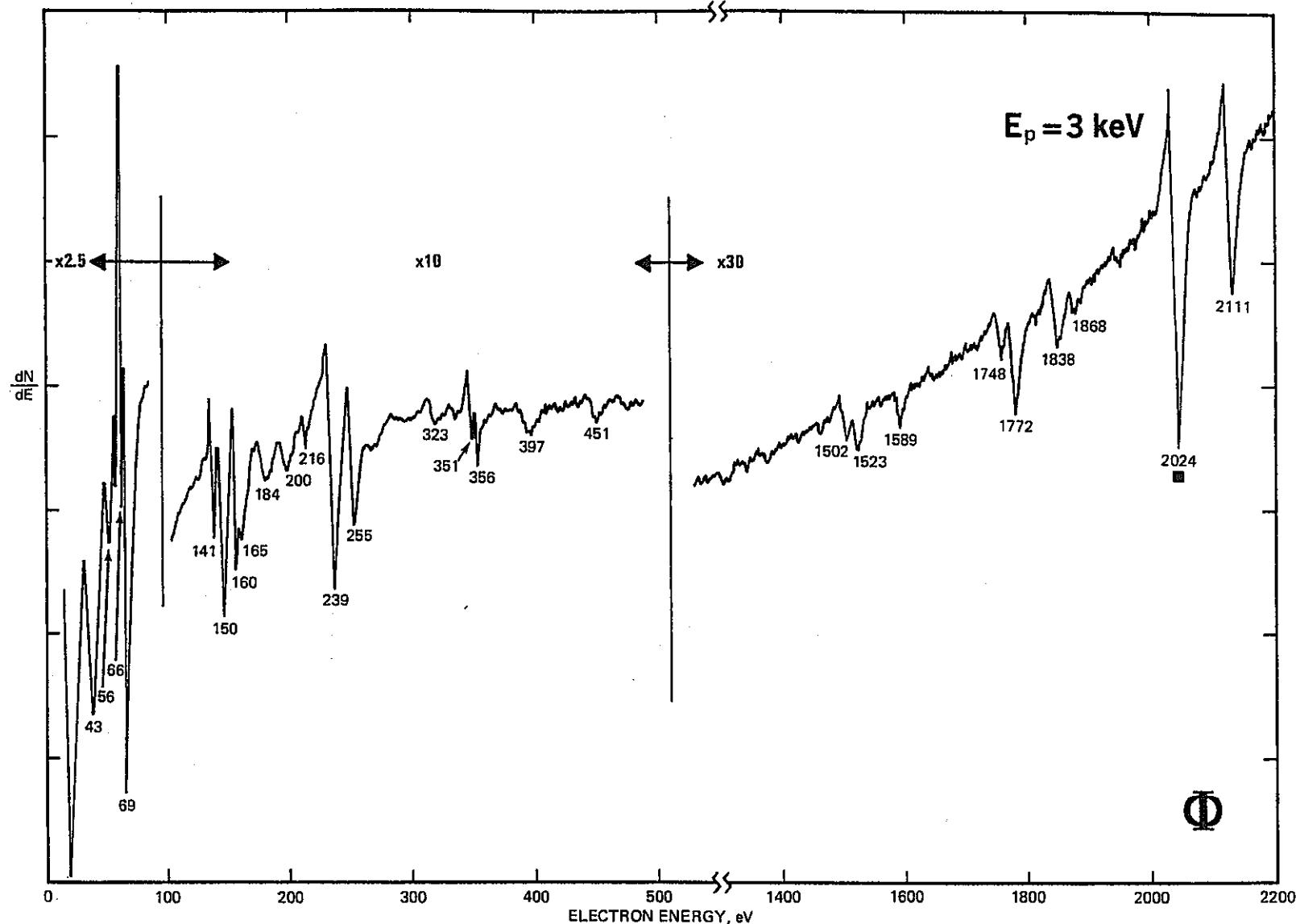


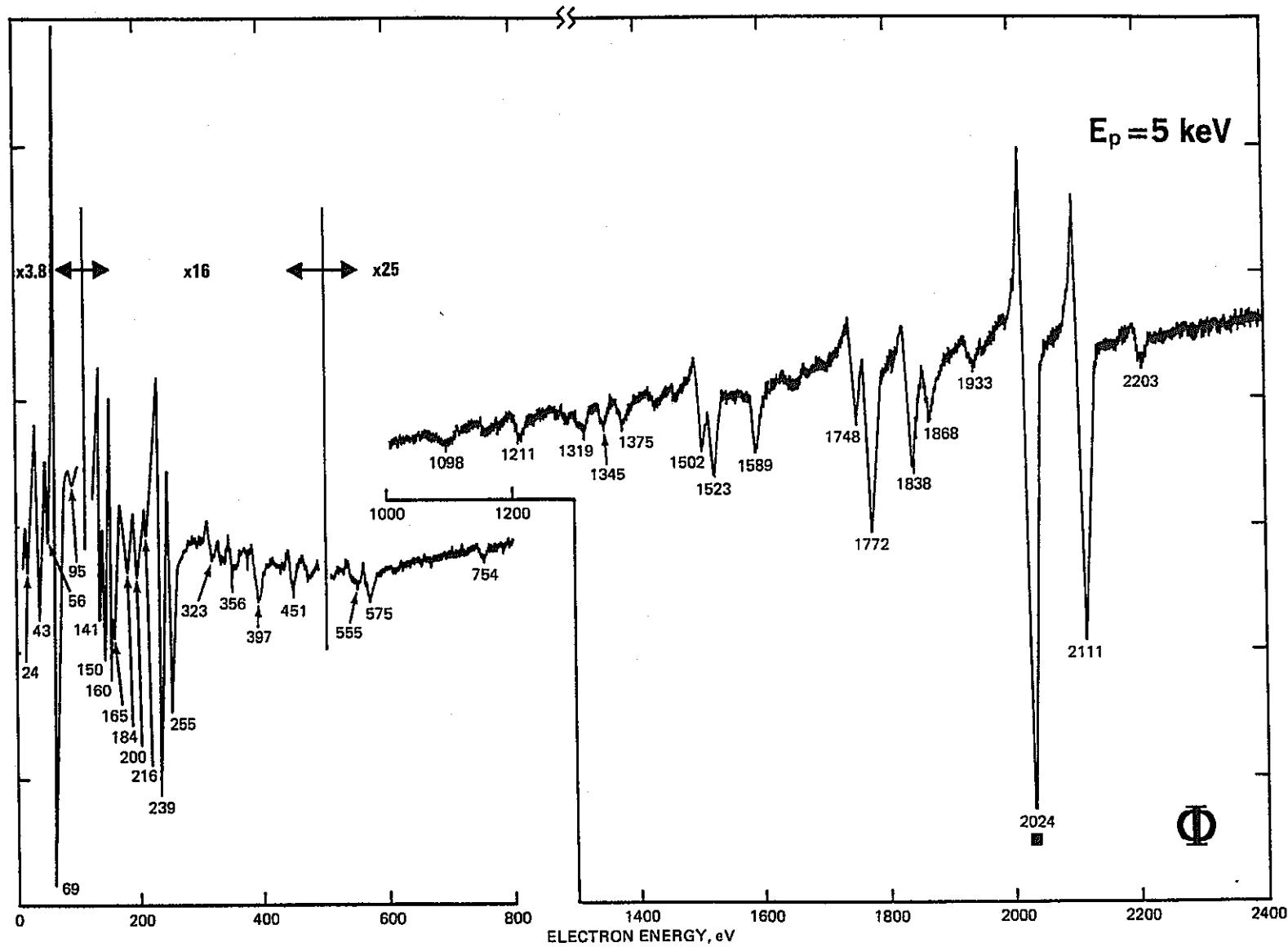


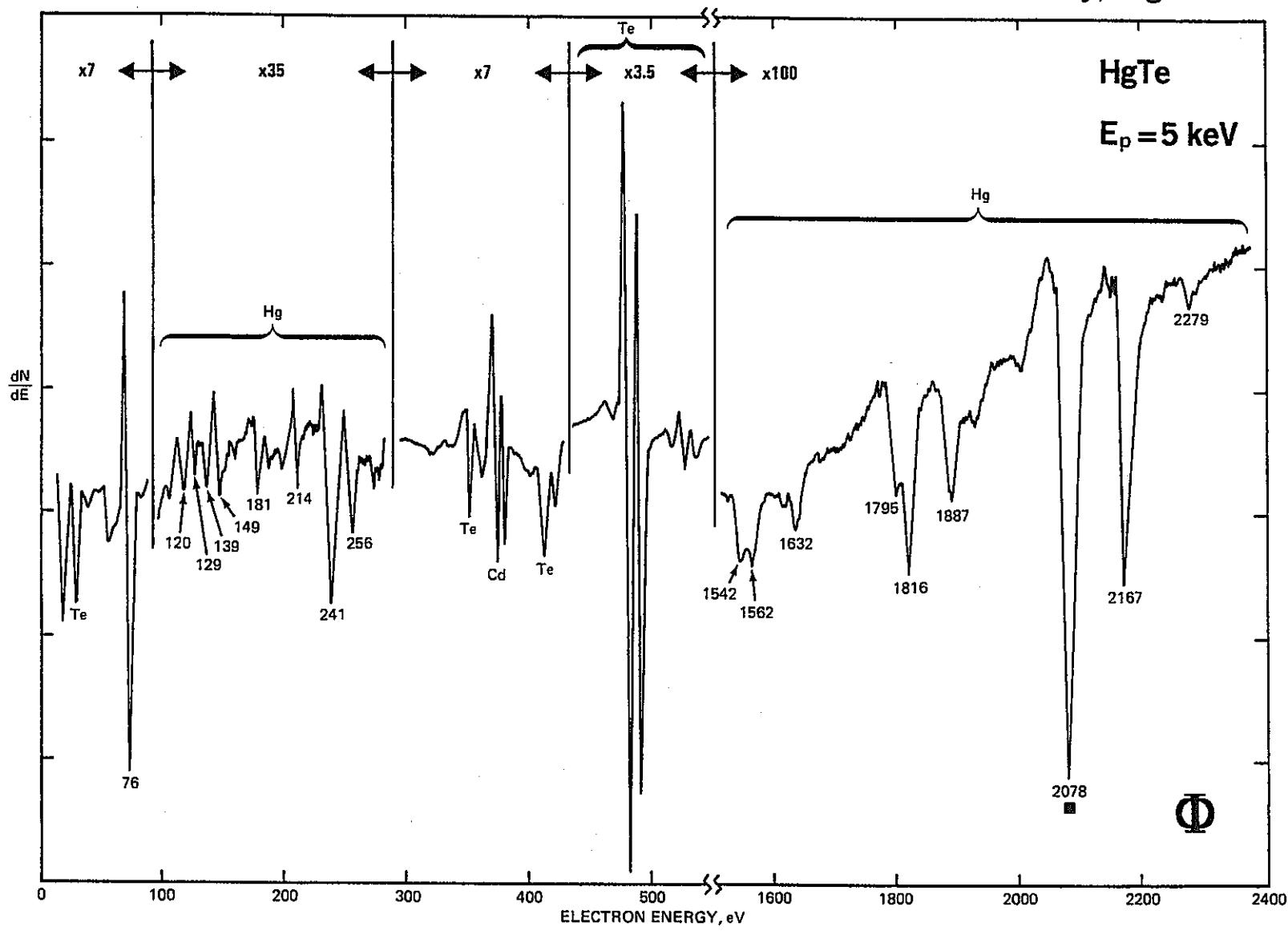


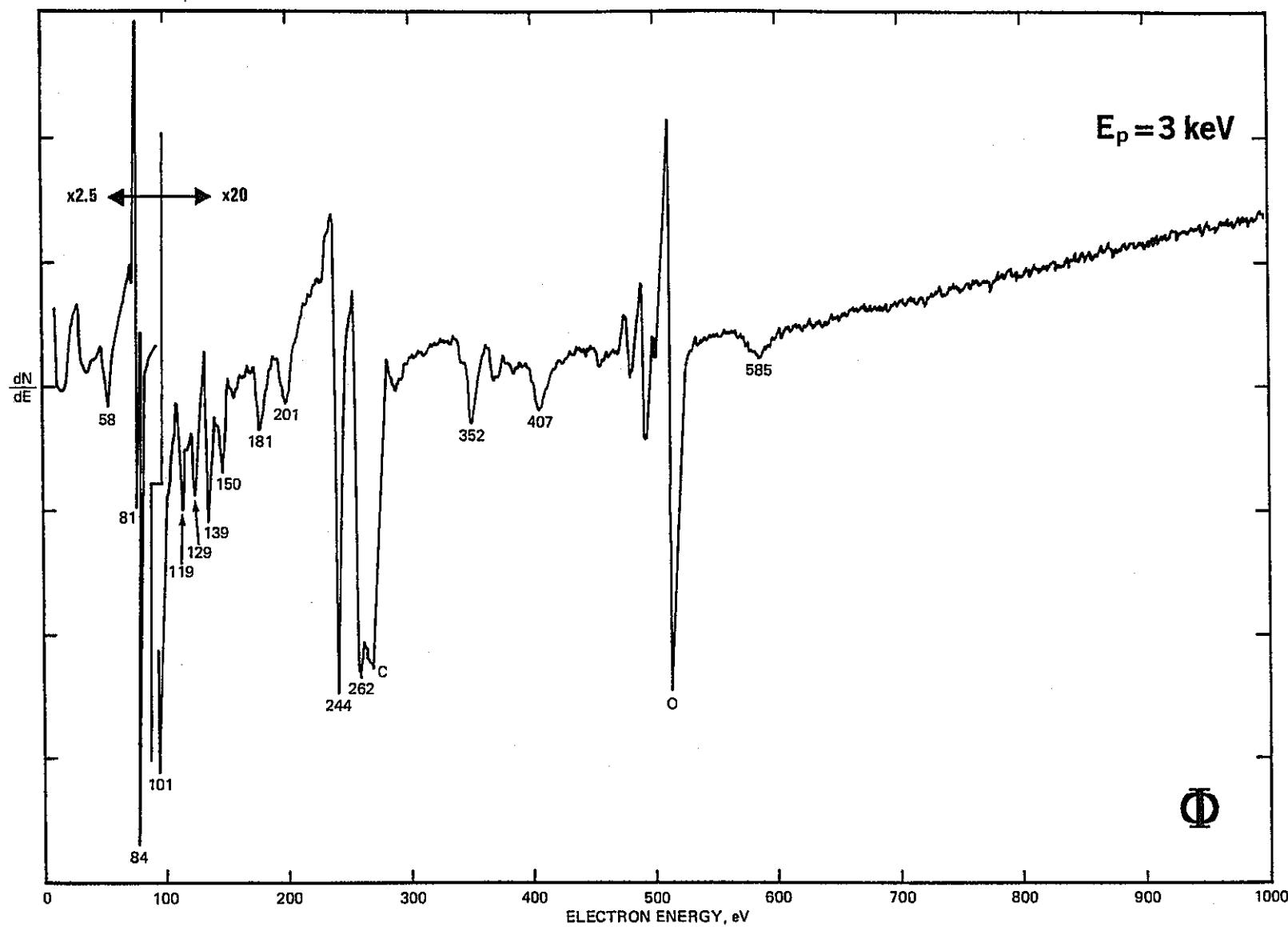
Platinum, Pt Atomic Number 78

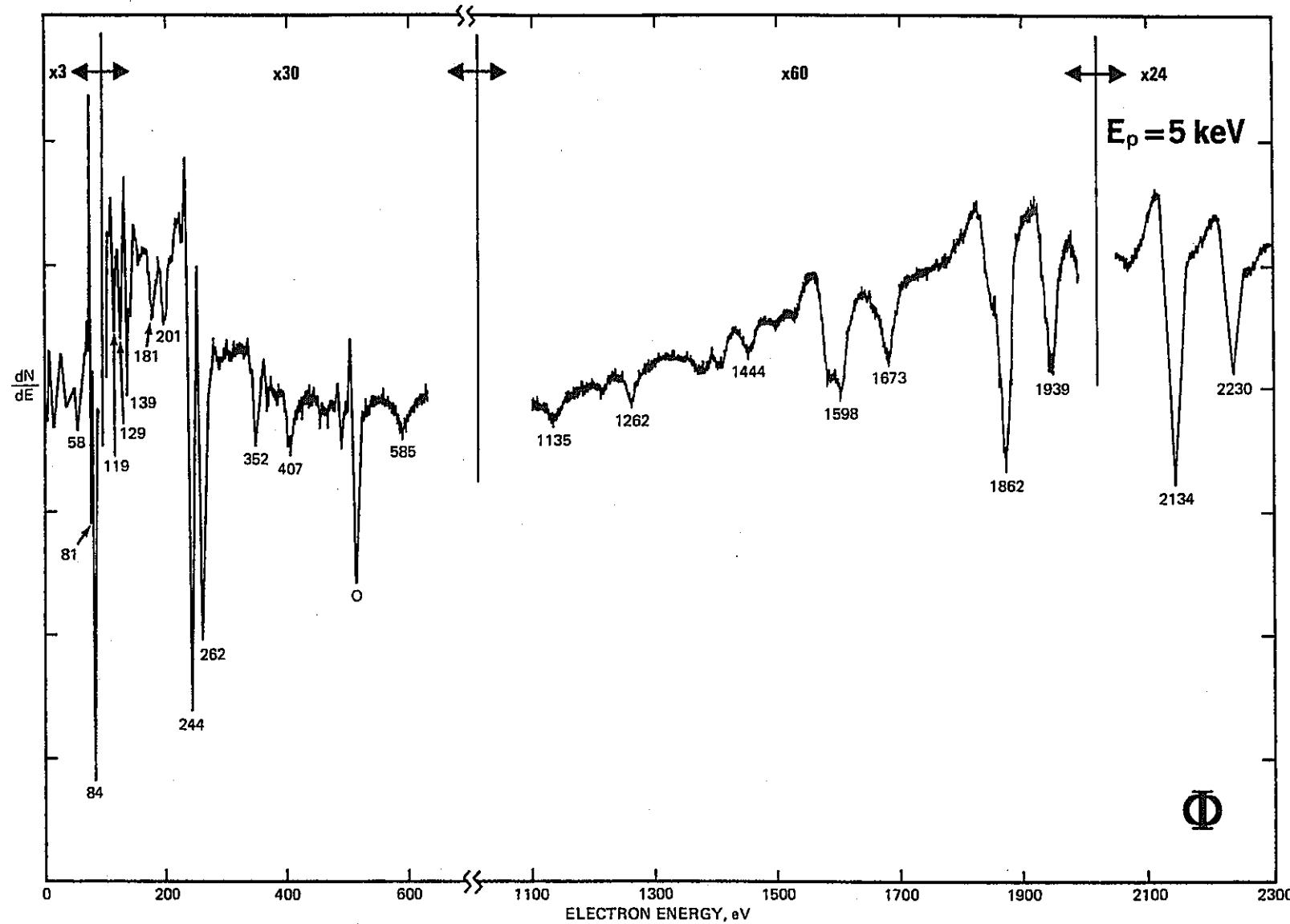




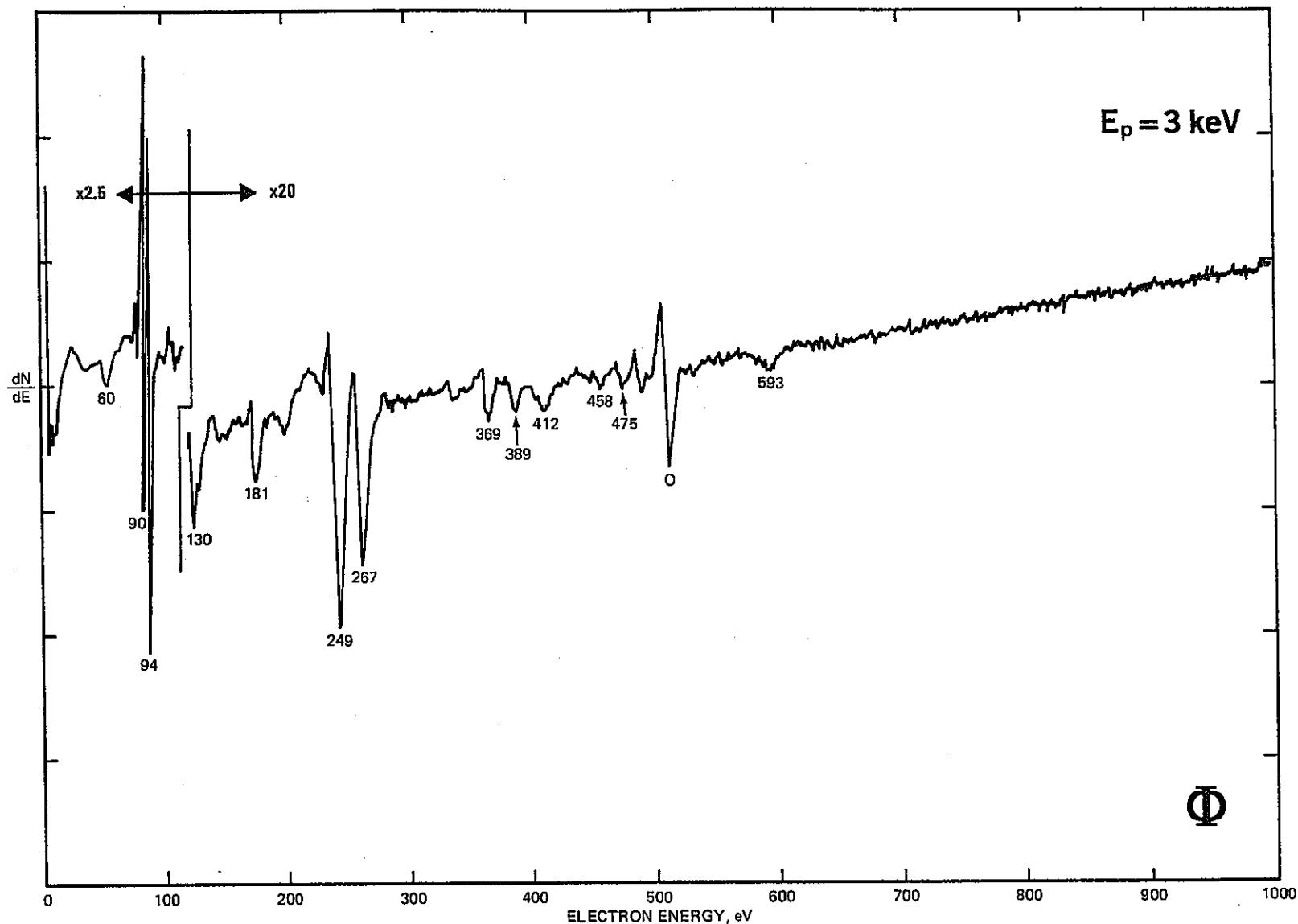


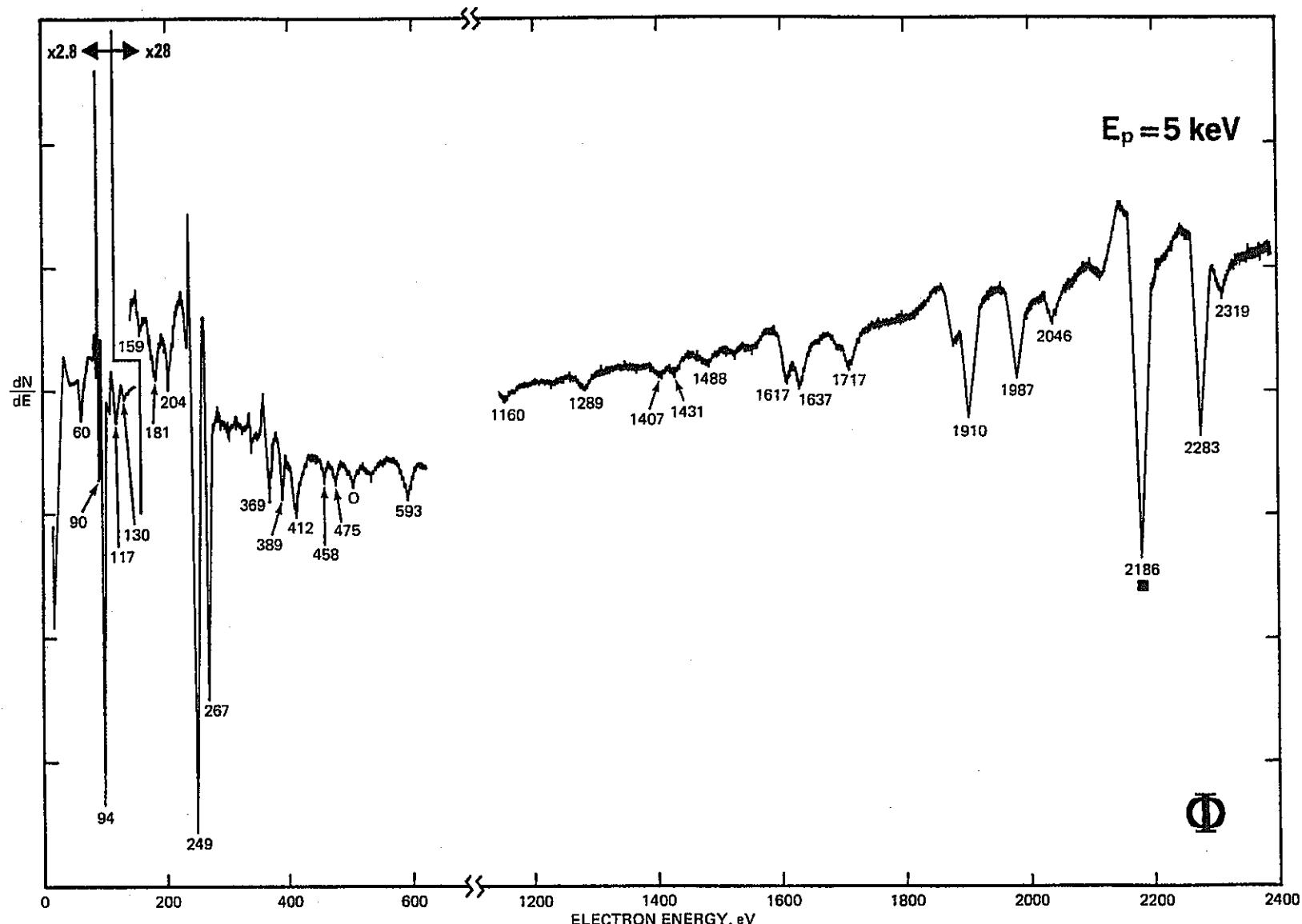


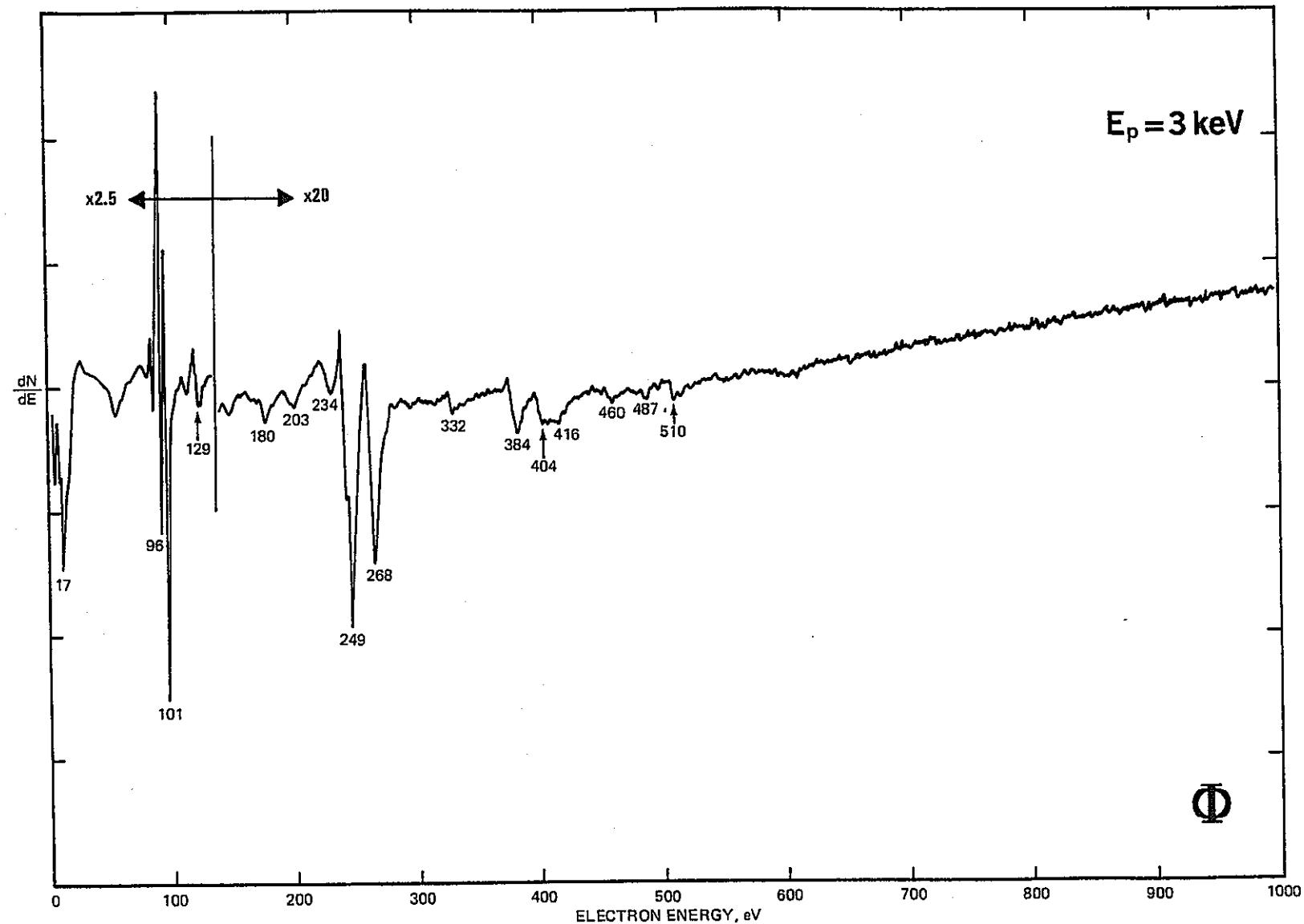




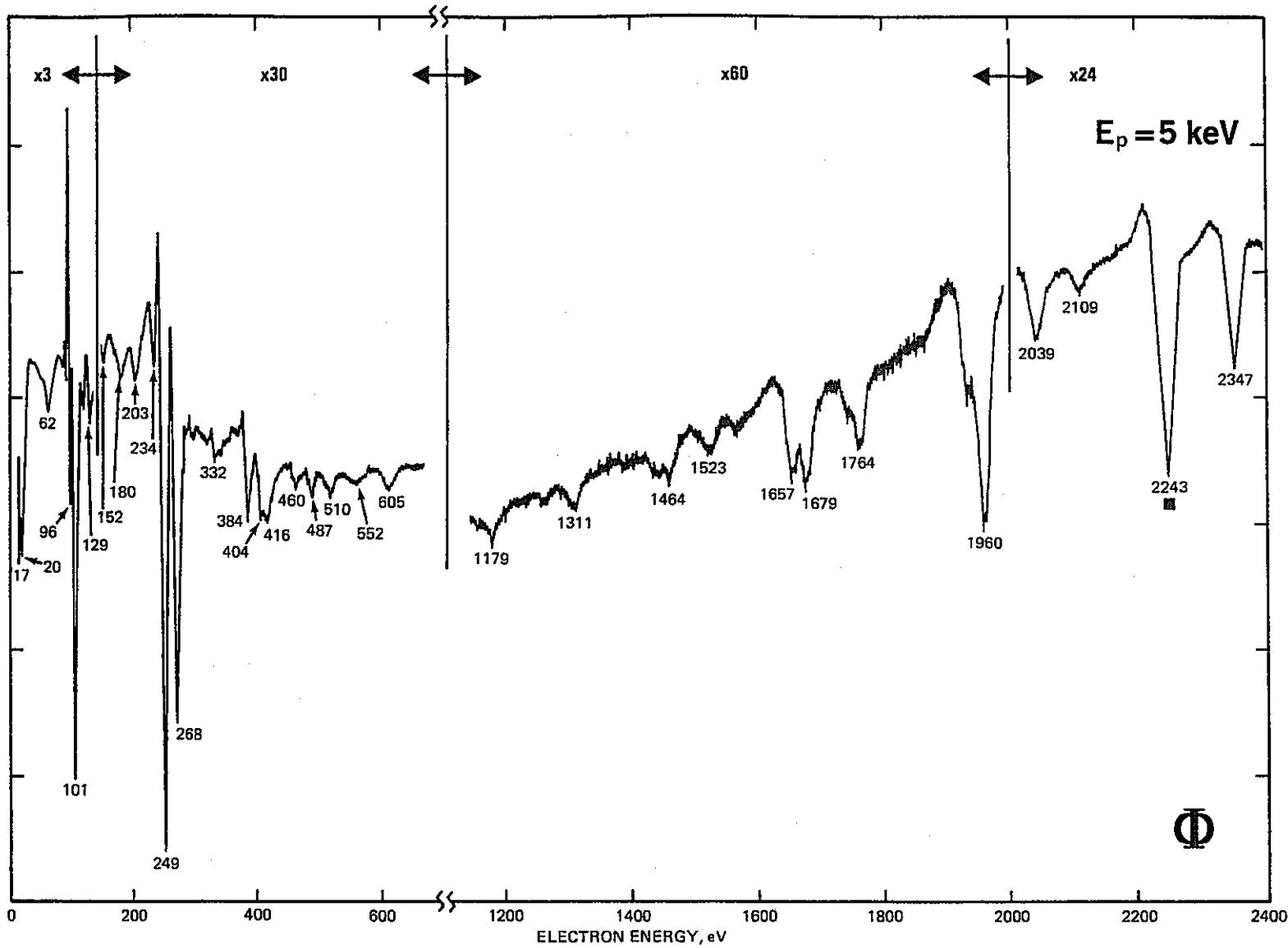
HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

Lead, Pb Atomic Number 82

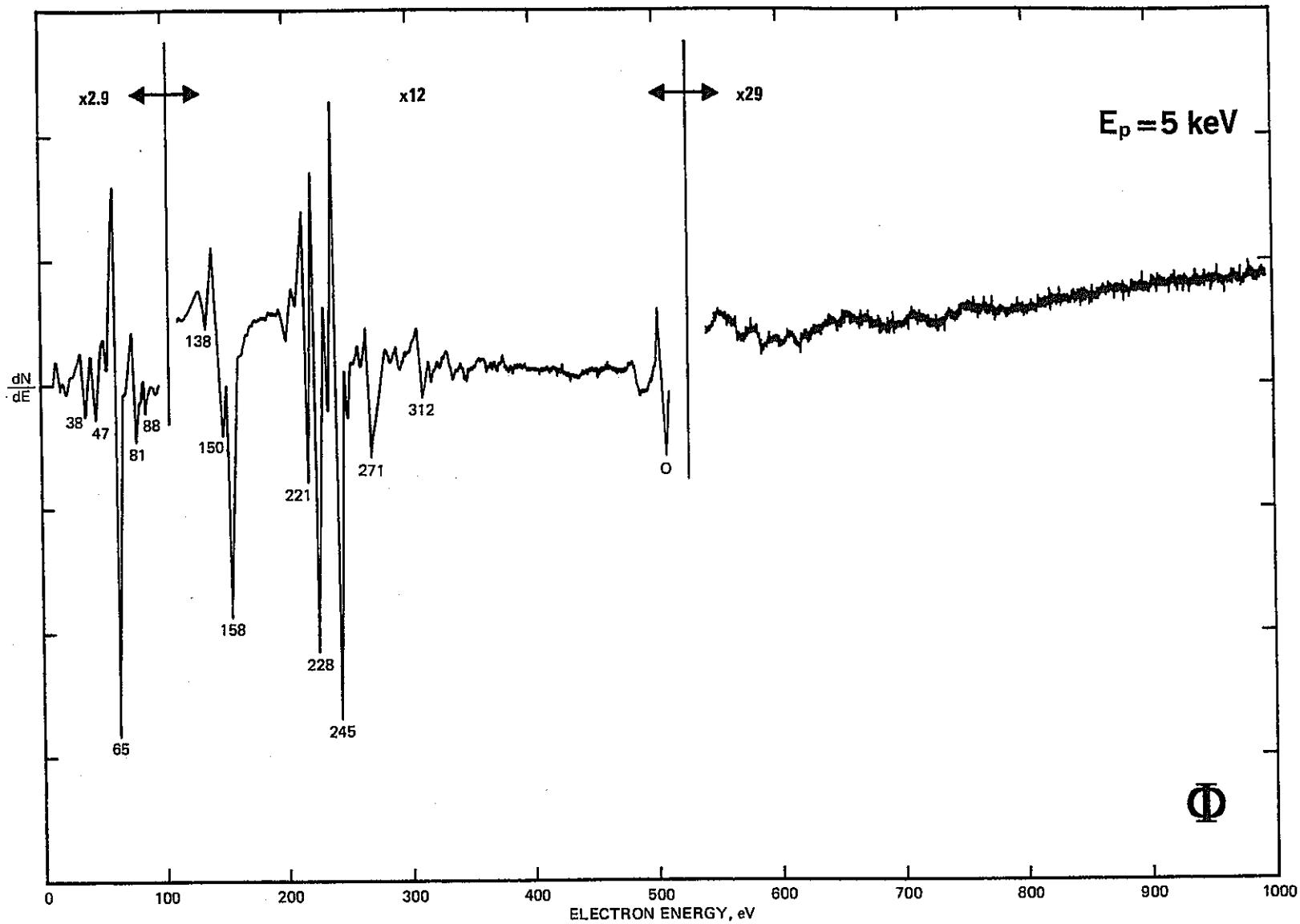


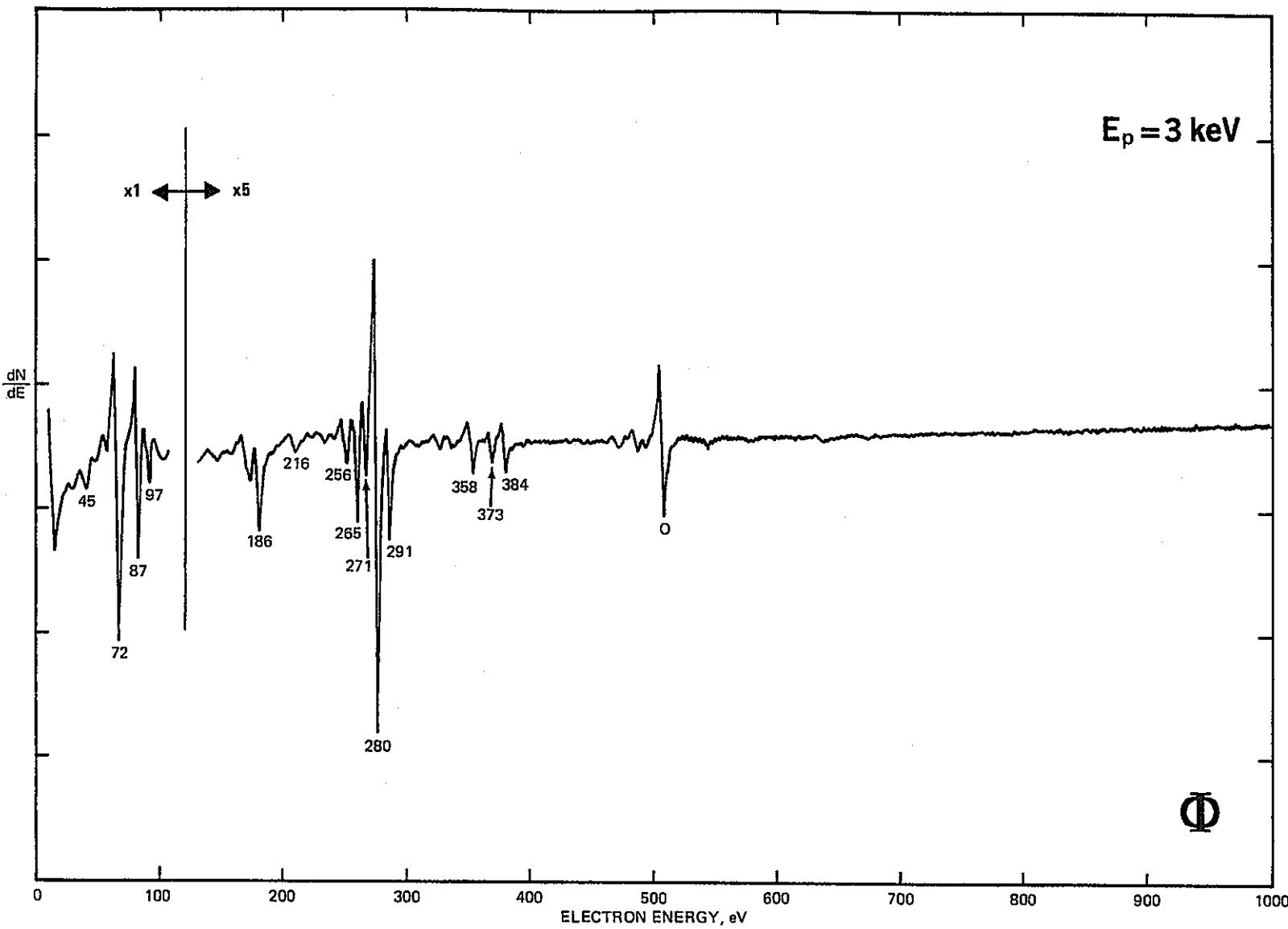


HANDBOOK OF AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY

Bismuth, Bi Atomic Number 83

Thorium, Th Atomic Number 90





III. ADDENDUM

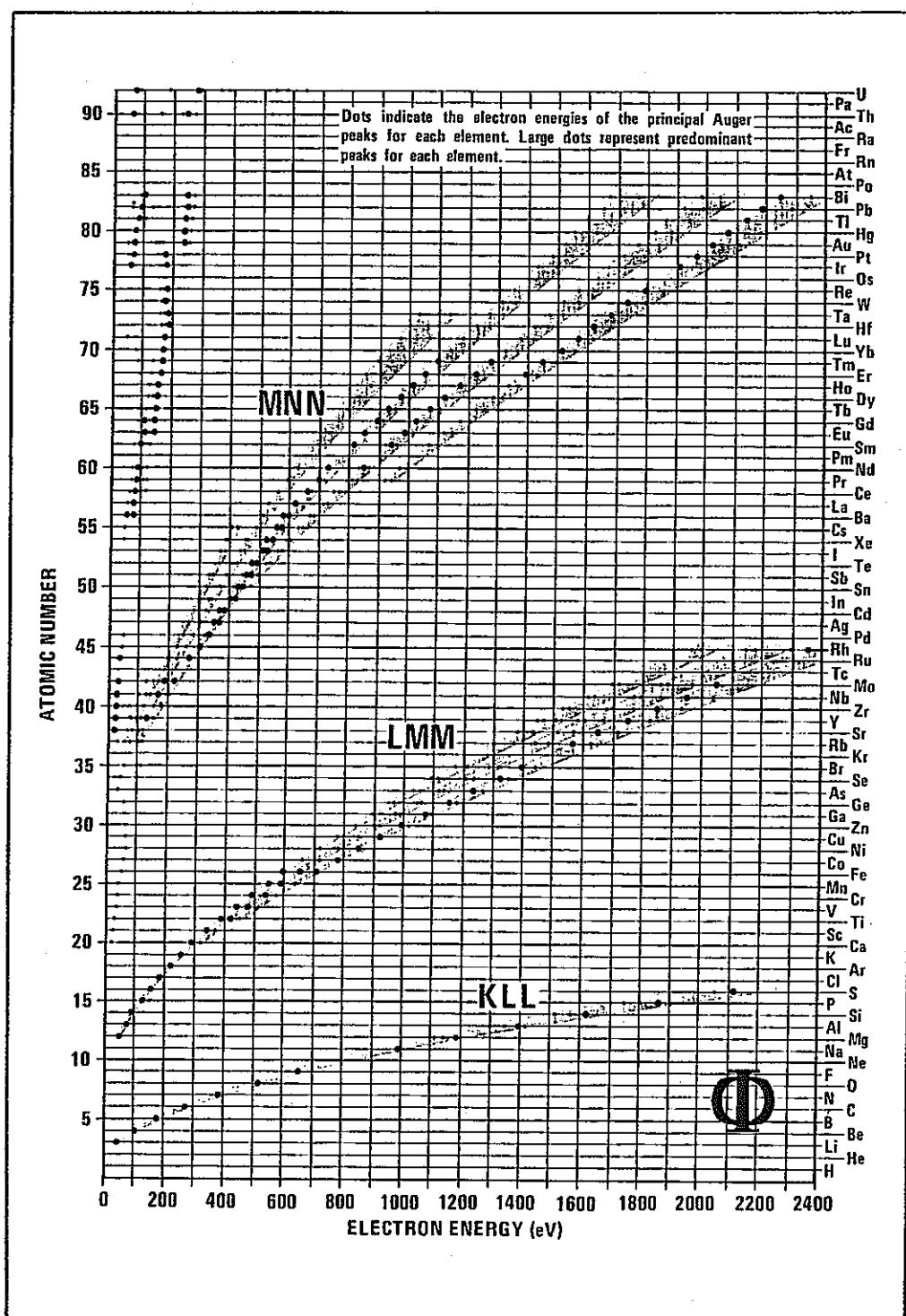
1. Periodic Table of the Elements

1 H																				2 He	
3 Li	4 Be																				
11 Na	12 Mg																				
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 Ac																			
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw					

2. Alphabetical Index of the Spectra

NAME	SYMBOL	ATOMIC NUMBER	PAGE	NAME	SYMBOL	ATOMIC NUMBER	PAGE
Aluminum	Al	13	43, 45, 47	Molybdenum	Mo	42	131, 133
Antimony	Sb	51	161, 163	Neodymium	Nd	60	183
Argon	Ar	18	65	Nickel	Ni	28	91, 93
Arsenic	As	33	111	Niobium	Nb	41	127, 129
Barium	Ba	56	175	Nitrogen	N	7	31
Beryllium	Be	4	21	Oxygen	O	8	33
Bismuth	Bi	83	243, 245	Palladium	Pd	46	141, 143
Boron	B	5	23	Phosphorus	P	15	55, 57
Bromine	Br	35	117	Platinum	Pt	78	225, 227
Cadmium	Cd	48	149, 151	Potassium	K	19	67
Calcium	Ca	20	69	Praseodymium	Pr	59	181
Carbon	C	6	25, 27, 29	Rhenium	Re	75	217, 219
Cerium	Ce	58	179	Rhodium	Rh	45	137, 139
Cesium	Cs	55	171, 173	Rubidium	Rb	37	119
Chlorine	Cl	17	63	Ruthenium	Ru	44	135
Chromium	Cr	24	77, 79	Samarium	Sm	62	185
Cobalt	Co	27	87, 89	Scandium	Sc	21	71
Copper	Cu	29	95, 97	Selenium	Se	34	113, 115
Dysprosium	Dy	68	193	Silicon	Si	14	49, 51, 53
Erbium	Er	68	197	Silver	Ag	47	145, 147
Europium	Eu	63	187	Sodium	Na	11	37
Fluorine	F	9	35	Strontium	Sr	38	121
Gadolinium	Gd	64	189	Sulfur	S	16	59, 61
Gallium	Ga	31	103, 105	Tantalum	Ta	73	209, 211
Germanium	Ge	32	107, 109	Tellurium	Te	52	165
Gold	Au	79	229, 231	Terbium	Tb	65	191
Hafnium	Hf	72	205, 207	Thallium	Tl	81	235, 237
Holmium	Ho	67	195	Thorium	Th	90	247
Indium	In	49	153, 155	Thulium	Tm	69	199
Iodine	I	53	167	Tin	Sn	50	157, 159
Iridium	Ir	77	221, 223	Titanium	Ti	22	73
Iron	Fe	26	83, 85	Tungsten	W	74	213, 215
Lanthanum	La	57	177	Uranium	U	92	249
Lead	Pb	82	239, 241	Vanadium	V	23	75
Lithium	Li	3	19	Xenon	Xe	54	169
Lutetium	Lu	71	203	Ytterbium	Yb	70	201
Magnesium	Mg	12	39, 41	Yttrium	Y	39	123
Manganese	Mn	25	81	Zinc	Zn	30	99, 101
Mercury	Hg	80	233	Zirconium	Zr	40	125

3. Chart of Principal Auger Electron Energies



PHYSICAL ELECTRONICS INDUSTRIES