

• X線の定義 電磁波 波長 0.01~2.5 nm (125 KeV~500 eV)

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{From Maxwell equations})$$

$$E = E_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

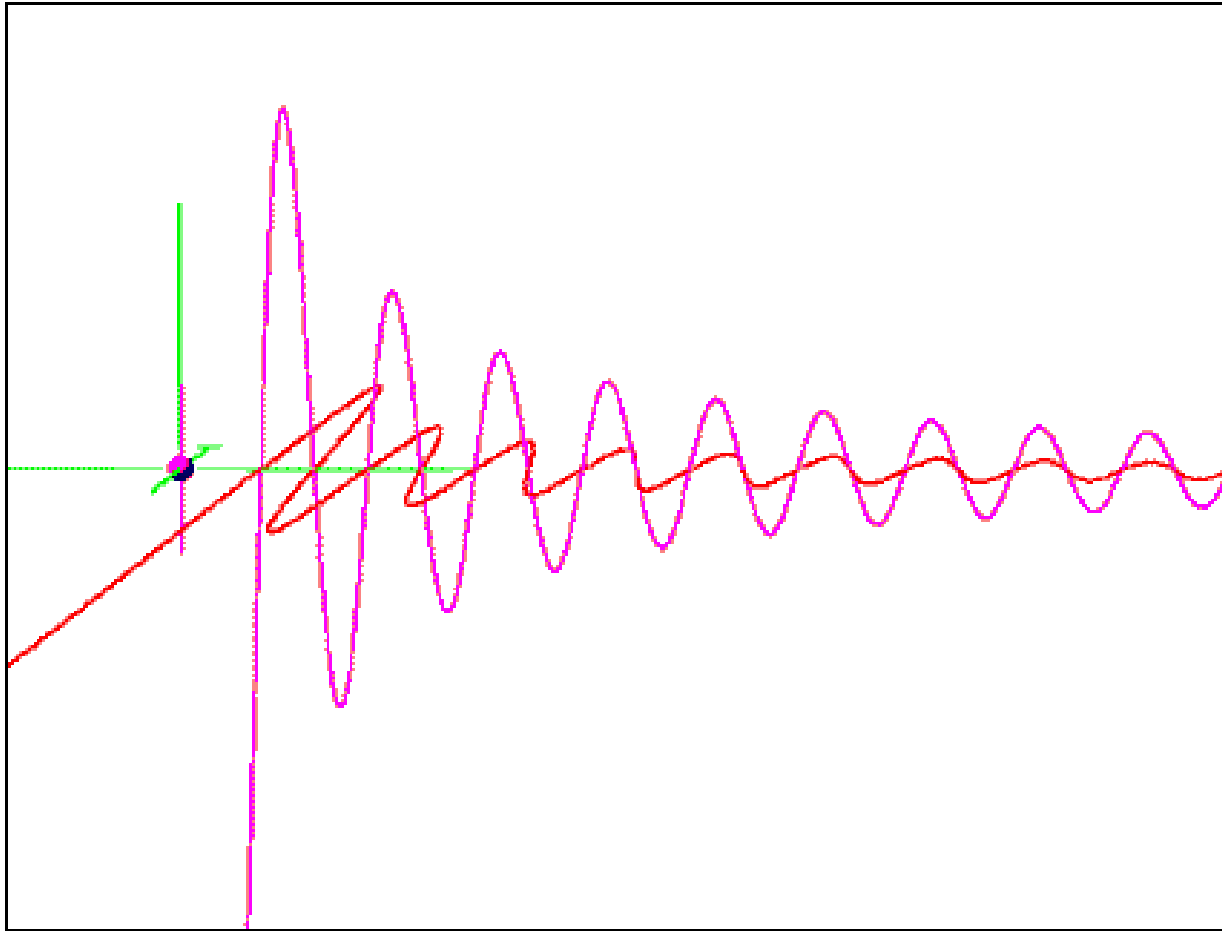
transverse, move in z direction

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi\nu$$

$$c = \omega/k = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$$

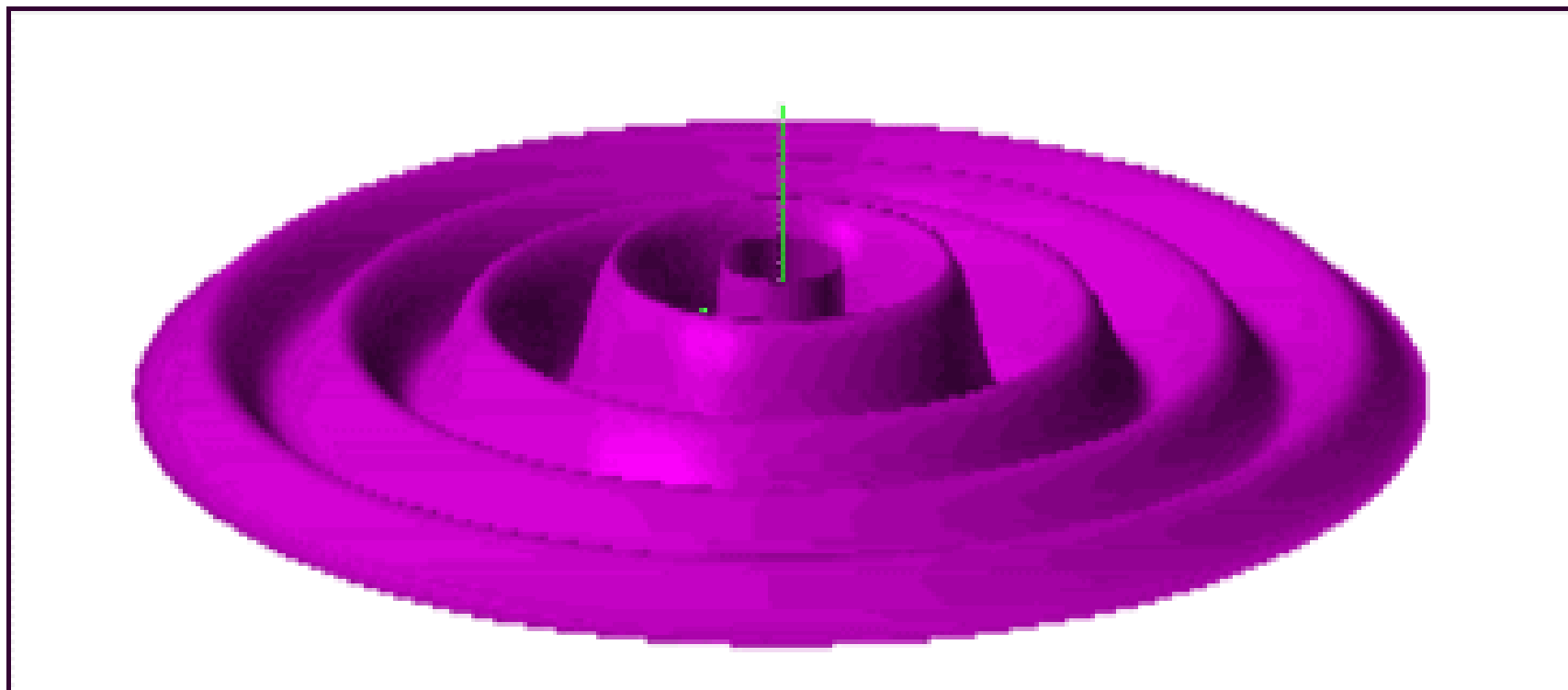
$$eV = \hbar\omega = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}$$

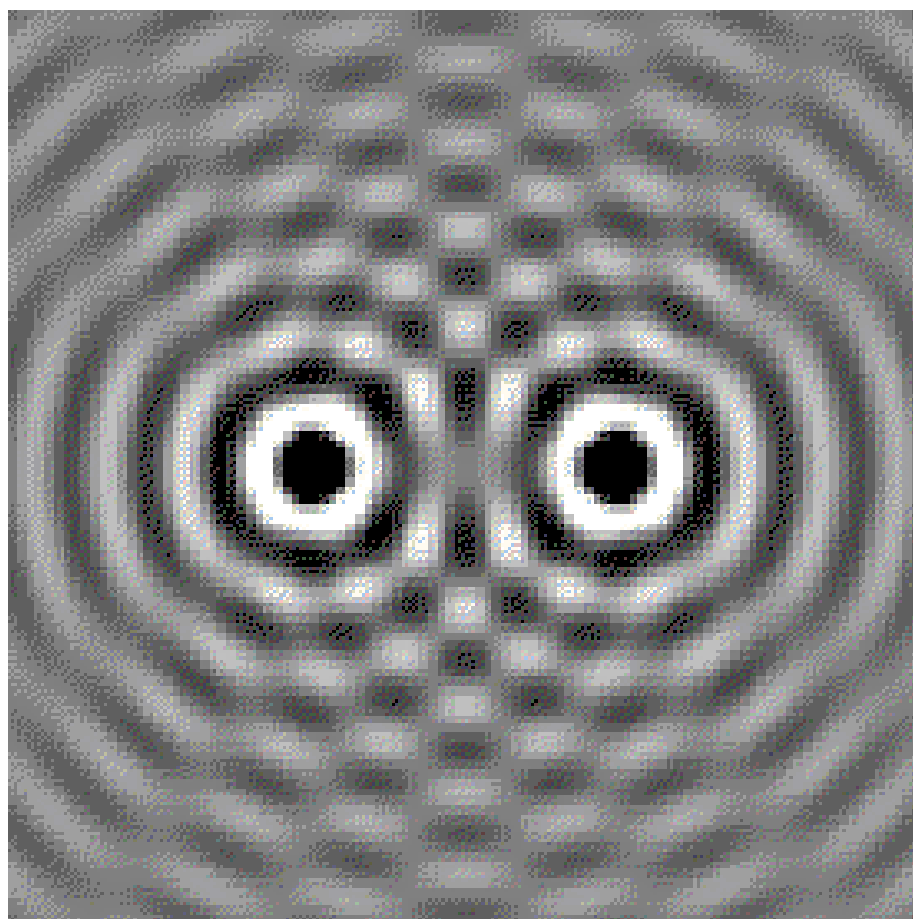
(the Duane – Hunt law $V = 1239.8/\lambda[\text{nm}]$)



中心に置かれた電子が単振動をしているとき、振動方向に垂直な一方向に伝わっていく電磁波の様子を示したもので、紫色が電場を、赤色が磁場を表す。電磁場といわれるように、電場と磁場が互いに影響し合って遠くまで伝播していきます。

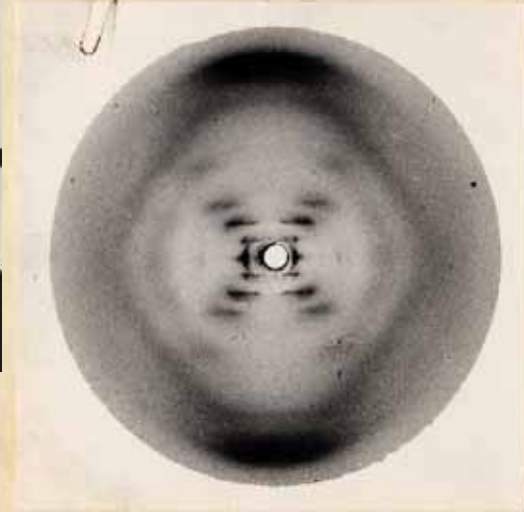
図に電子の振動方向に垂直な水平面に伝わる電場のみを示した。





原子がX線を散乱する現象は、古典電磁気学では次のように説明できる。X線は原子に作用する振動電場とみなす。原子にX線が入射すると、原子中の電子がそれと相互作用して、同じ振動数で振動し始める。一般に、荷電粒子が加速度をもつと振動電磁場が生まれ、粒子を中心にした球面波が出る。荷電粒子の電荷を q 、質量を m 、加速度を a とすれば、散乱されるX線の強度は $(aq)^2$ に比例する。荷電粒子が電場 E から受ける力を F とすると、 $F = qE = ma$ の関係にある。つまり散乱X線の強度は $(q^2/m)^2$ に比例する。原子核は電子に比べて3桁以上も重いため、X線散乱のほとんどすべては電子が受け持つことになる。

Rosalind Franklin



Franklin & Gosling
Photomicrograph
Type B

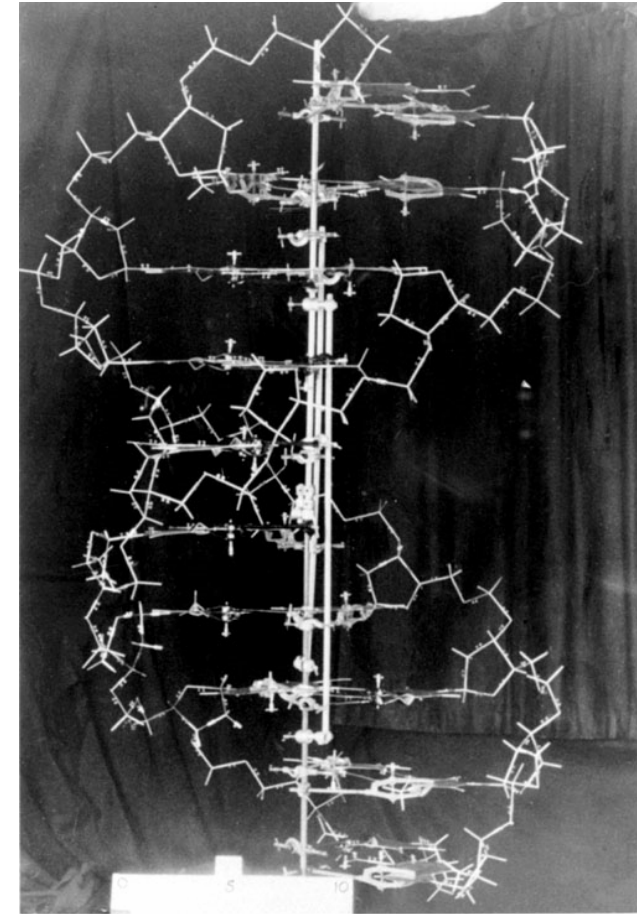
Photo 1



Watson and Crick walk along the Backs

Cold Spring Harbor Laboratory Archives

Francis Crick 37 James Watson 25



Original DNA demonstration model (scale gives distance in Angstroms)

Cold Spring Harbor Laboratory Archives

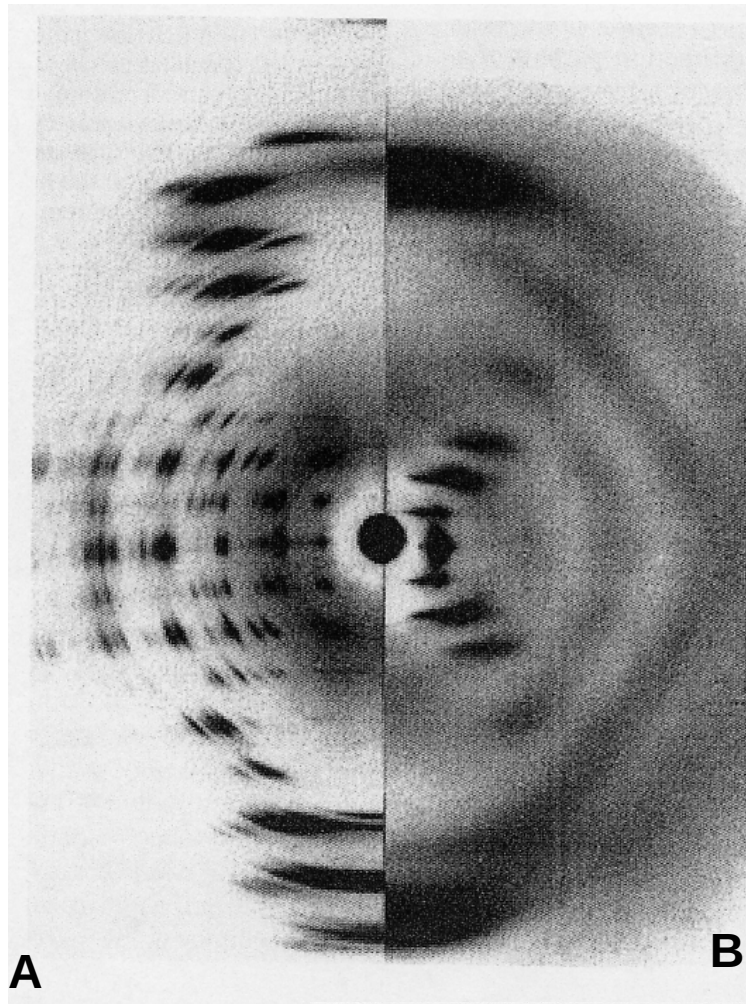


Figure 18.15 Diffraction patterns of DNA, showing the patterns obtained for both A-DNA (left half) and B-DNA (right half). (Courtesy of W. Fuller.)

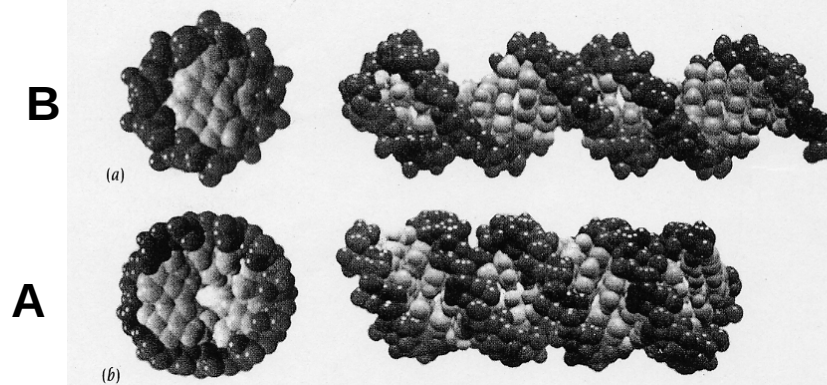


Figure 7.2 Three helical forms of DNA, each containing 22 nucleotide pairs, shown in both side and top views. The sugar-phosphate backbone is dark; the paired nucleotide bases are light. (a) B-DNA, which is the most common form in cells. (b) A-DNA, which is obtained under dehydrated nonphysiological conditions. Notice the hole along the helical axis in this form. (c) Z-DNA, which can be formed by certain DNA sequences under special circumstances. (Courtesy of Richard Feldmann.)

X線の発生：高速の電子線を重金属でできたターゲットに衝突させると、運動エネルギーの大部分は熱になるが、同時にX線が発生する。発生したX線のスペクトルには、**連続X線**と鋭いピークをもつ**固有X線**がある。

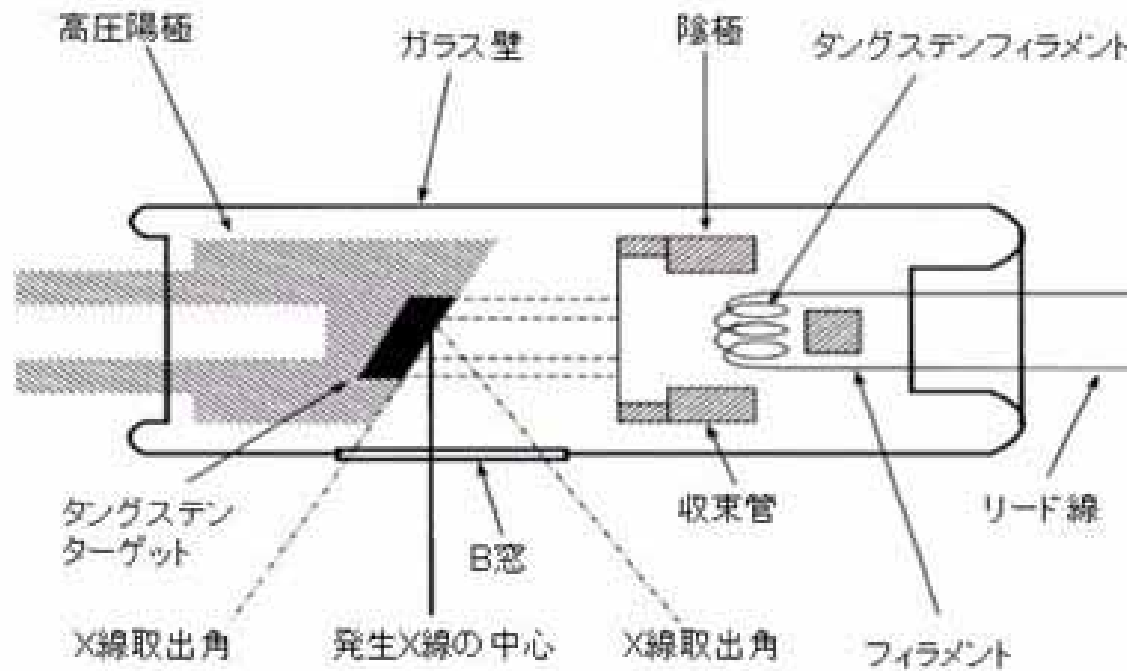
連続[制動放射 Bremsstrahlung]・特性（固有）[内殻電子レベル， 定義]

Moseleyの法則：量子力学から説明される。

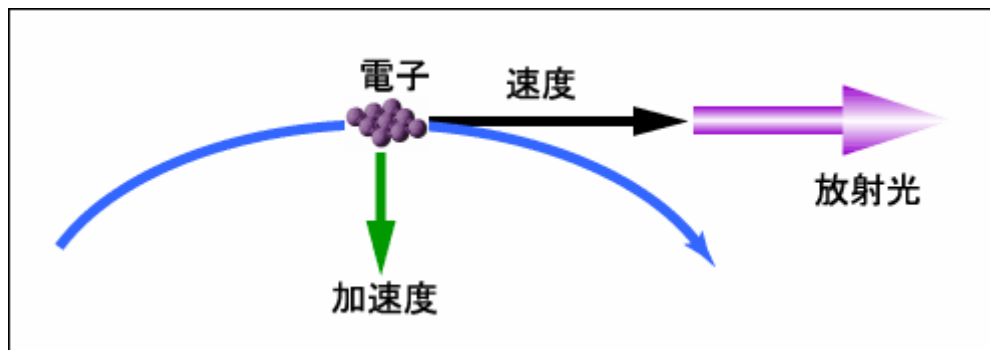
$$\lambda = \frac{c}{A^2(Z-B)^2}, \quad \nu = \frac{c}{\lambda} = A^2(Z-B)^2, \quad (\epsilon_n = -\frac{Z^2 m e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2 n^2})$$

(1)

・発生源：X線管球、シンクロトロン放射 (See Fig.)



電子が進行方向に加速または減速することで力を受けた場合の電磁波放射を**制動放射(Bremsstrahlung)**と呼びます。電子のエネルギーが高くなると、それにつれて放射光の指向性が強くなります



シンクロトロン放射

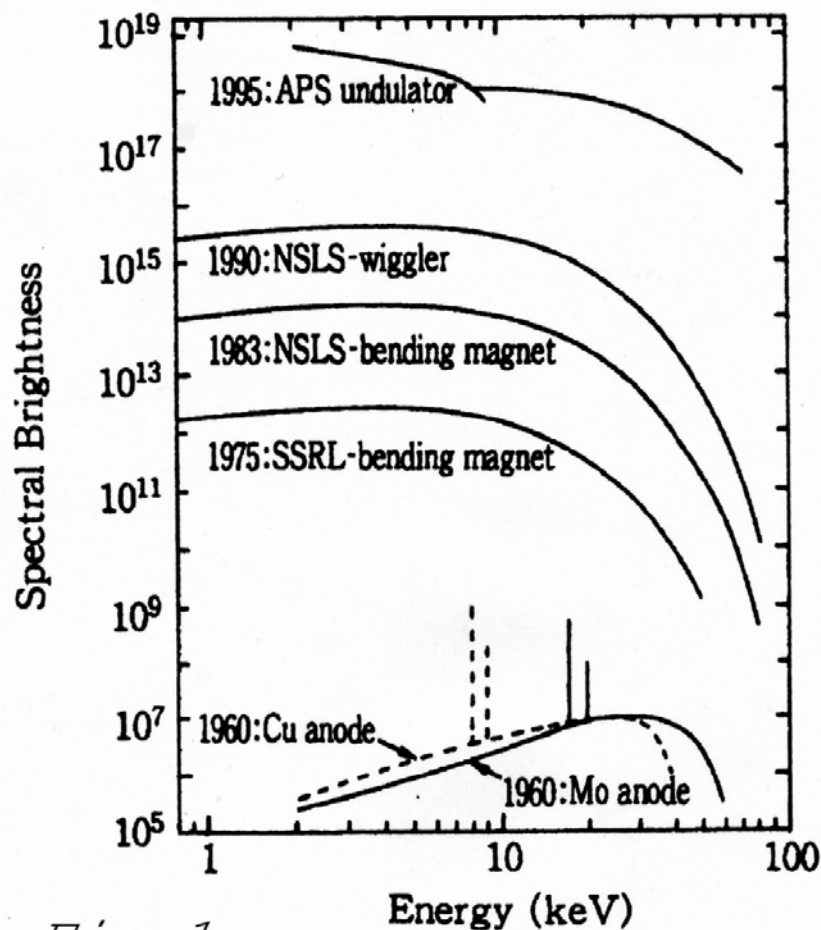


Fig. 1

SOR光及び一般のX線光源のエネルギーと輝度
の関係(Stanford Synchrotron Radiation
Laboratory, SSRL; National Synchrotron Light
Source, NSLS; Advanced Photon Source, APS
;いずれもアメリカ)。

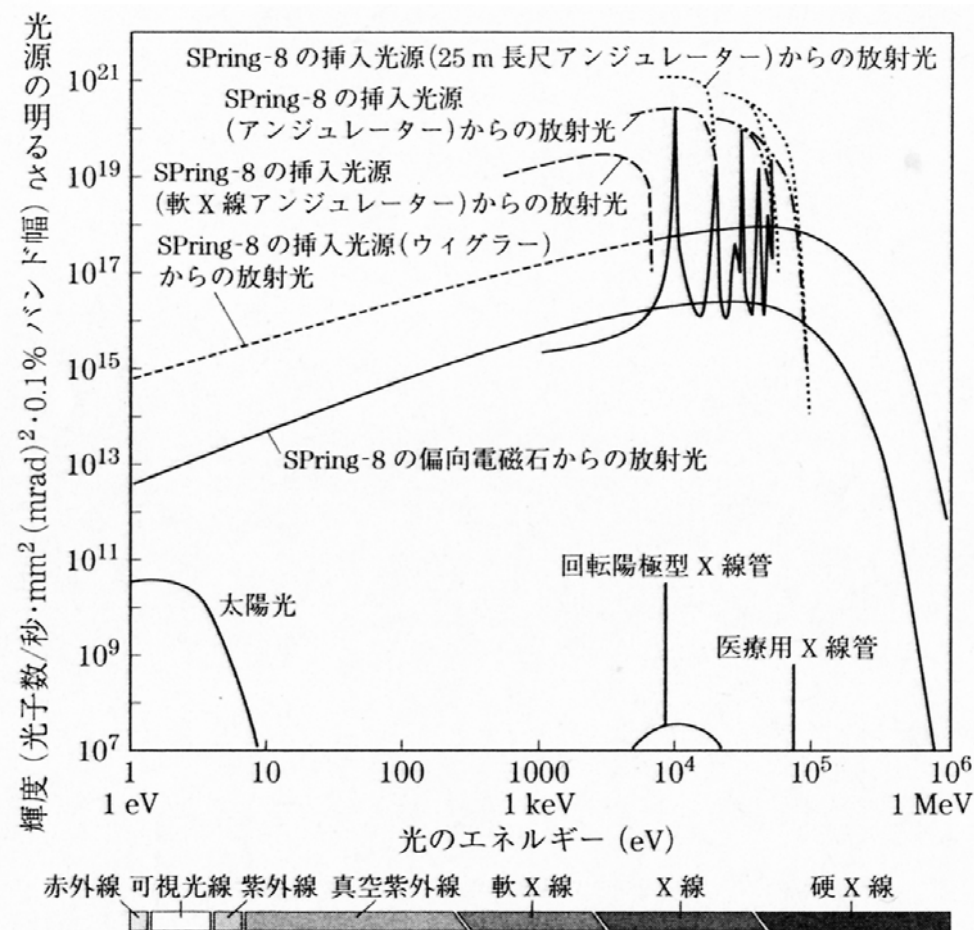


図 2.12 SPring-8 で利用できるさまざまな光源の強度

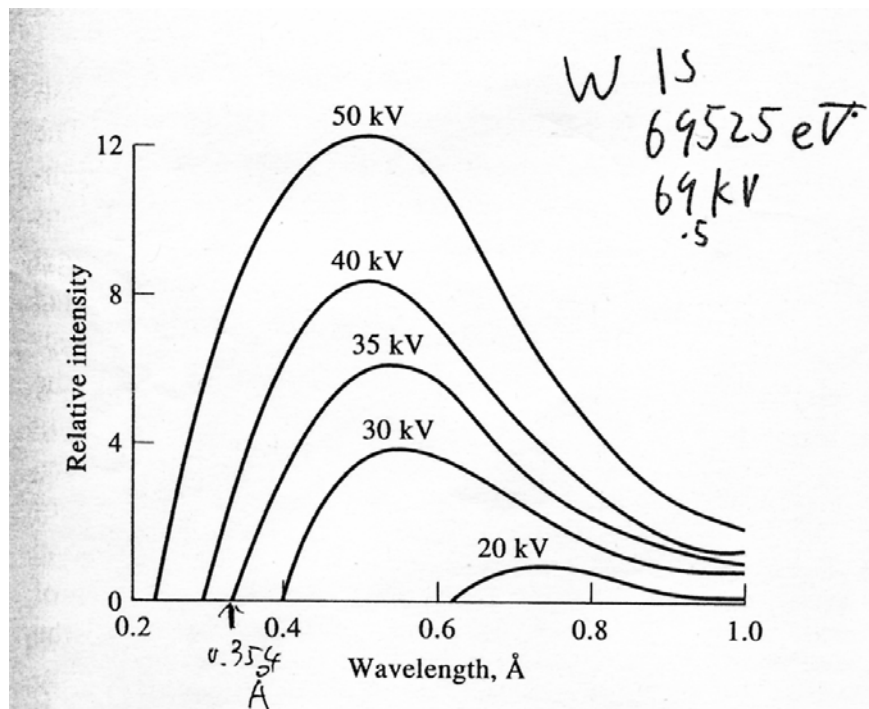


Figure 12-1 Distribution of continuum radiation from an X-ray tube with a tungsten target. The numbers above the curves indicate the accelerating voltages.

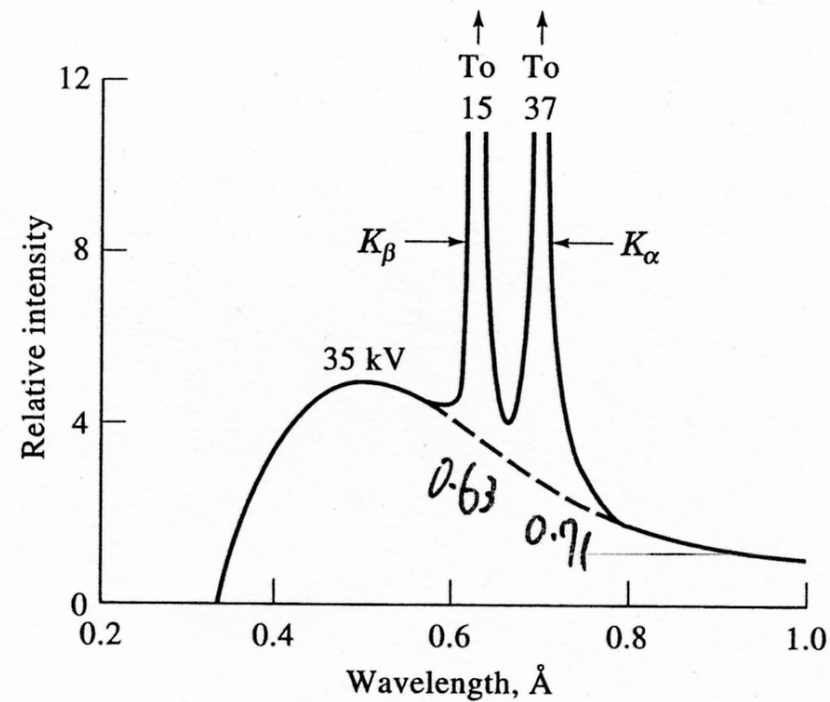
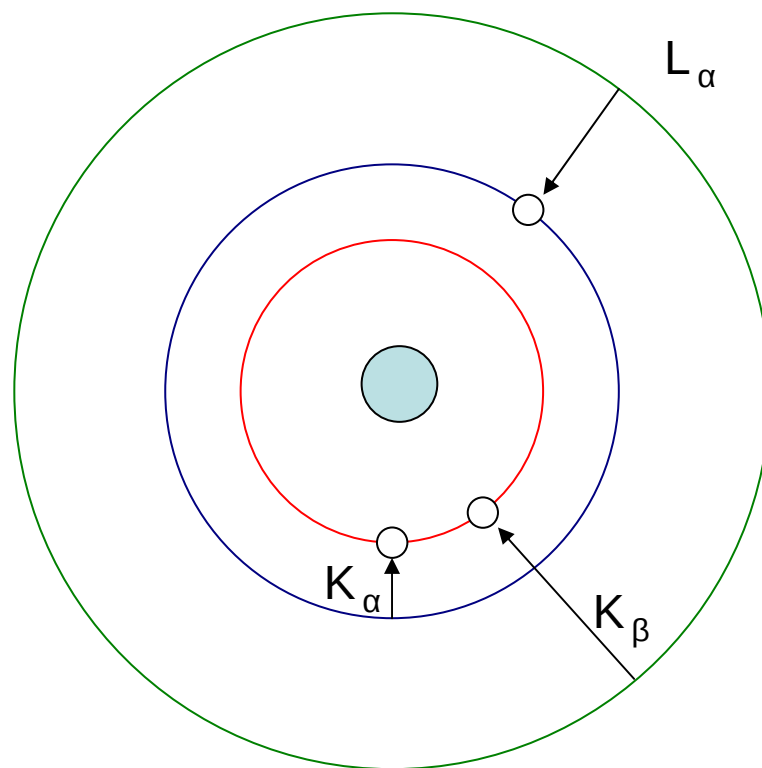


Figure 12-2 Line spectrum for an X-ray with a molybdenum target.



白丸は電子線によって生成した正孔

- : $n=1$ - : $n=2$ - : $n=3$

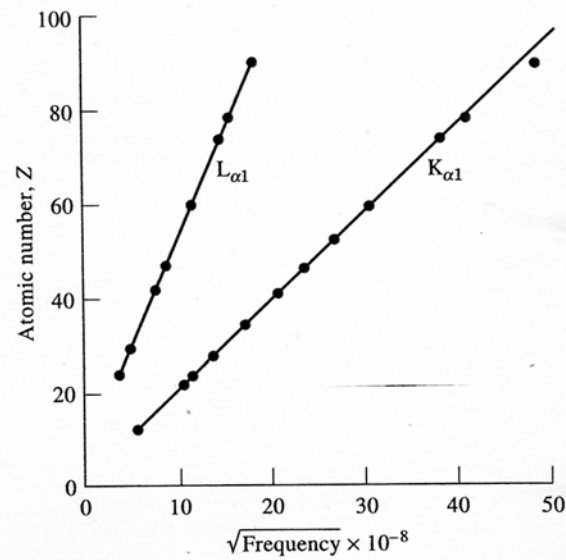
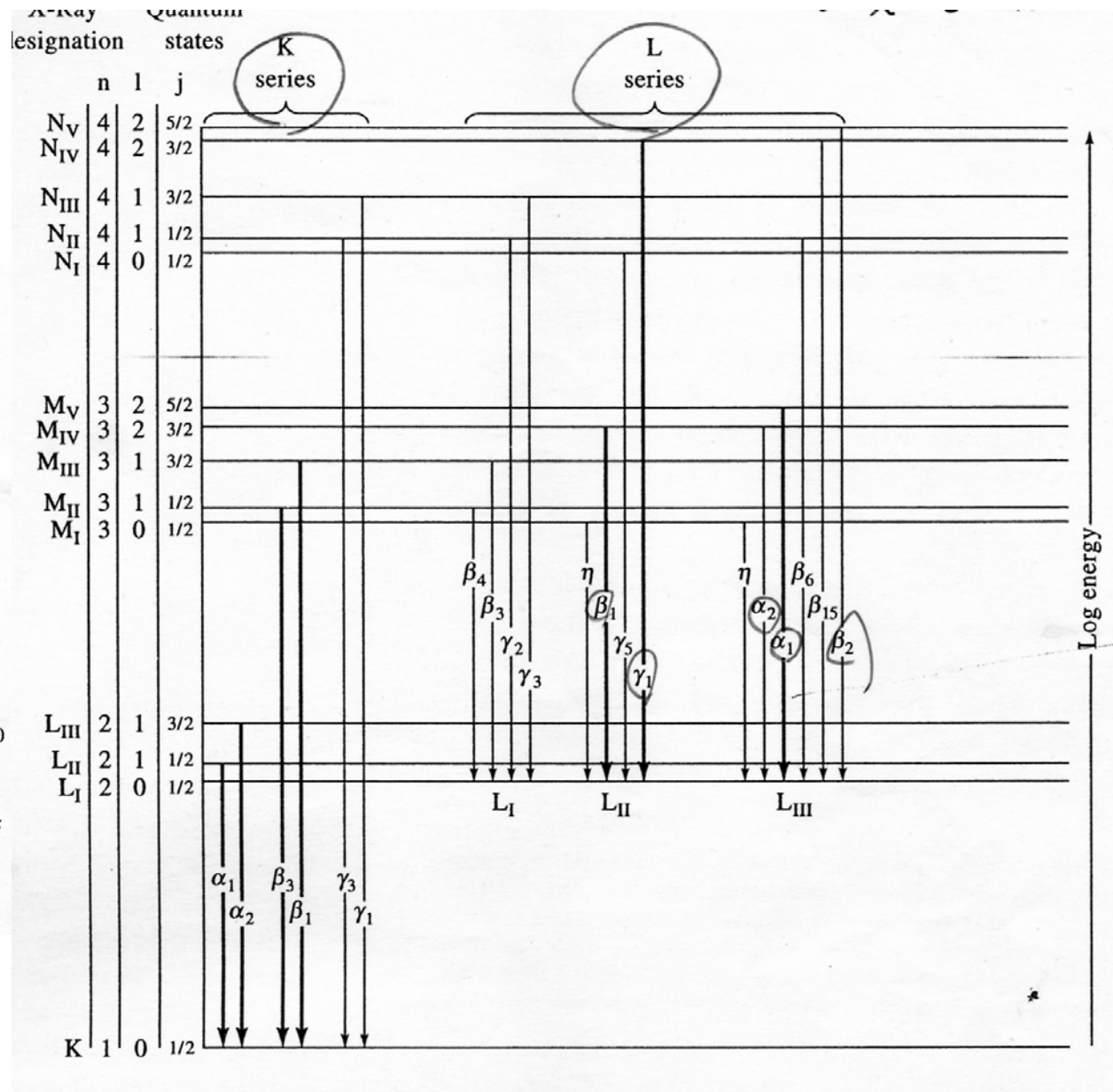


Figure 12-3 Relationship between X-ray emission frequency and atomic number for $K_{\alpha 1}$ and $L_{\alpha 1}$ lines.

$$\lambda = \frac{c}{A^2(Z-B)^2}, \quad \nu = \frac{c}{\lambda} = A(Z-B)^2$$



スピン軌道相互作用による微細構造

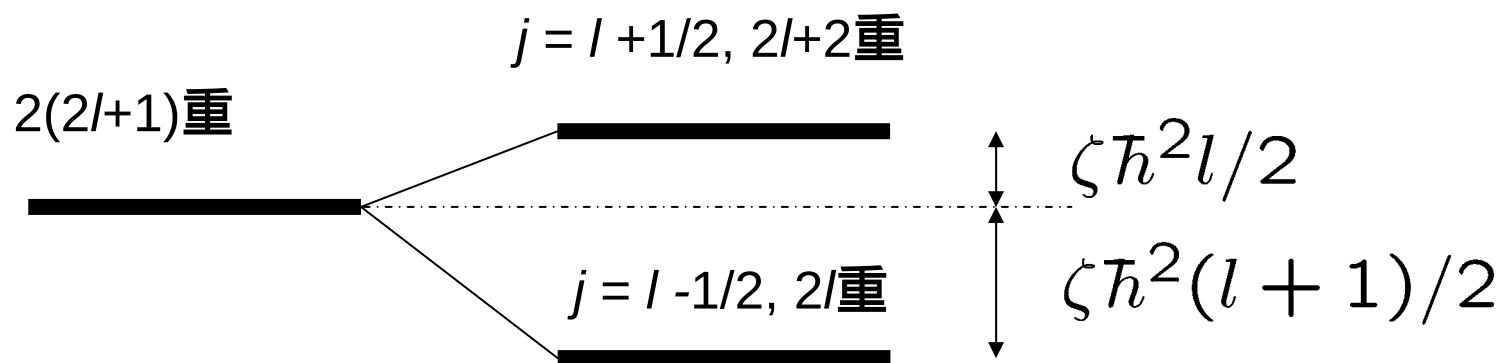
$$H' = \zeta \mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$$

主量子数 n , 方位量子数 l , 内量子数 j

n, l, j

$1s_{1/2}$ $2s_{1/2}$ $2p_{1/2}(2)$ $2p_{3/2}(4)$

$3s_{1/2}$ $3p_{1/2}$ $3p_{3/2}$ $3d_{3/2}(4)$ $3d_{5/2}(6)$



光学遷移 選択則 電気双極子近似

$$l' = l \pm 1$$

Electron binding energies in eV for the elements in their natural forms Values compiled by [wyn Williams](#)

Element	K	L-I	L-II	L-III	M-I	M-II	M-III	M-IV	M-V	N-I	N-II	N-III
	1s	2s	2p1/2	2p3/2	3s	3p1/2	3p3/2	3d3/2	3d5/2	4s	4p1/2	4p3/2
12 Mg	1303.0+	88.6*	49.6+	49.21								
13 Al	1559.0	117.8*	72.9*	72.5*								
14 Si	1839	149.7*b	99.8*	99.2*								
19 K	3608.4*	378.6*	297.3*	294.6*	34.8*	18.3*	18.3*					
20 Ca	4038.5*	438.4+	349.7+	346.2+	44.3+	25.4+	25.4+					
21 Sc	4492	498.0*	403.6*	398.7*	51.1*	28.3*	28.3*					
22 Ti	4966	560.9+	460.2+	453.8+	58.7+	32.6+	32.6+					
23 V	5465	626.7+	519.8+	512.1+	66.3+	37.2+	37.2+					
24 Cr	5989	696.0+	583.8+	574.1+	74.1+	42.2+	42.2+					
25 Mn	6539	769.1+	649.9+	638.7+	82.3+	47.2+	47.2+					
26 Fe	7112	844.6+	719.9+	706.8+	91.3+	52.7+	52.7+					
27 Co	7709	925.1+	793.2+	778.1+	101.0+	58.9+	59.9+					
28 Ni	8333	1008.6+	870.0+	852.7+	110.8+	68.0+	66.2+					
29 Cu	8979	1096.7+	952.3+	932.7	122.5+	77.3+	75.1+					
30 Zn	9659	1196.2*	1044.9*	1021.8*	139.8*	91.4*	88.6*	10.2*	10.1*			
31 Ga	10367	1299.0*b	1143.2+	1116.4+	159.51	103.5+	100.0+	18.7+	18.7+			
32 Ge	11103	1414.6*b	1248.1*b	1217.0*b	180.1*	124.9*	120.8*	29.8*	29.2*			
40 Zr	17998	2532	2307	2223	430.3+	343.5+	329.8+	181.1+	178.8+	50.6+	28.5+	27.1+
41 Nb	18986	2698	2465	2371	466.6+	376.1+	360.6+	205.0+	202.3+	56.4+	32.6+	30.8+
42 Mo	20000	2866	2625	2520	506.3+	411.6+	394.0+	231.1+	227.9+	63.2+	37.6+	35.5+
43 Tc	21044	3043	2793	2677	544*	447.6*	417.7*	257.6*	253.9*	69.5*	42.3*	39.9*
44 Ru	22117	3224	2967	2838	586.1*	483.3+	461.5+	284.2+	280.0+	75.0+	46.3+	43.2+
45 Rh	23220	3412	3146	3004	628.1+	521.3+	496.5+	311.9+	307.2+	81.4*b	50.5+	47.3+
46 Pd	24350	3604	3330	3173	671.6+	559.9+	532.3+	340.5+	335.2+	87.1*b	55.7+a	50.9+
47 Ag	25514	3806	3524	3351	719.0+	603.8+	573.0+	374.0+	368.3	97.0+	63.7+	58.3+
48 Cd	26711	4018	3727	3538	772.0+	652.6+	618.4+	411.9+	405.2+	109.8+	63.9+a	63.9+a

Element	K	L-I	L-II	L-III	M-I	M-II	M-III	M-IV	M-V	N-I	N-II	N-III
	1s	2s	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s	4p _{1/2}	4p _{3/2}
50 Sn	29200	4465	4156	3929	884.7+	756.5+	714.6+	4g _{3.2} +	484.9+	137.1+	83.6+a	
	83.6+a											
51 Sb	30491	4698	4380	4132	940+	812.7+	766.4+	537.5+	528.2+	153.2+	95.6+a	95.6+a
72 Hf	65351	11271	10739	9561	2601	2365	2107	1716	1662	538*	438.2+	380.7+
73 Ta	67416	11682	11136	9881	2708	2469	2194	1793	1735	563.4+	463.4+	400.9+
74 W	69525	12100	11544	10207	2820	2575	2281	1949	1809	594.1+	490.4+	423.61
75 Re	71676	12527	11959	10535	2932	2682	2367	1949	1883	625.4+	518.7+	446.8+
76 Os	73871	12968	12385	10871	3049	2792	2457	2031	1960	658.2+	549.1+	470.7+
77 Ir	76111	13419	12824	11215	3174	2909	2551	2116	2040	691.1+	577.8+	495.8+
78 Pt	78395	13880	13273	11564	3296	3027	2645	2202	2122	725.4+	609.1+	519.4+
79 Au	80725	14353	13734	11919	3425	3148	2743	2291	2206	762.1+	642.7+	546.3+
80 Hg	83102	14839	14209	12284	3562	3279	2847	2385	2295	802.2+	680.2+	576.6+
81 Tl	85530	15347	14698	12658	3704	3416	2957	2485	2389	846.2+	720.5+	609.5+
82 Pb	88005	15861	15200	13035	3851	3554	3066	2586	2484	891.8+	761.9+	643.5+
83 Bi	90526	16388	15711	13419	3999	3696	3177	2688	2580	939+	805.2+	678.8+

- X線の吸収：

吸収端 (K_α , K_β よりも短波長側) (Fig.)

Lambert-Beerの法則 $P/P_0 = e^{-\mu x} = e^{-\mu_M \rho x}$,

$$\mu \propto \lambda^3 Z^3 \quad \mu_M = W_A \mu_A + W_B \mu_B + \dots,$$

μ_M は質量吸収係数 (cm^2/g), W_i は質量比率。

Filter (Fig.)

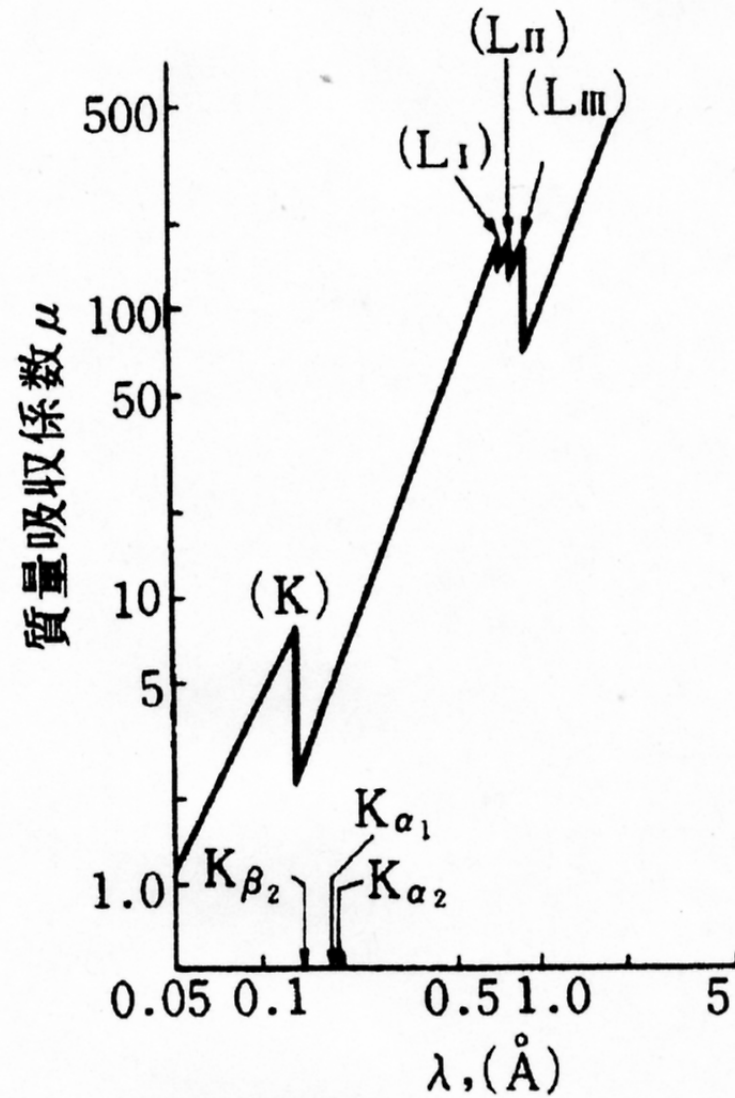


Fig. 2 X線の波長と質量吸収
係数との関係 (試料: Pb)

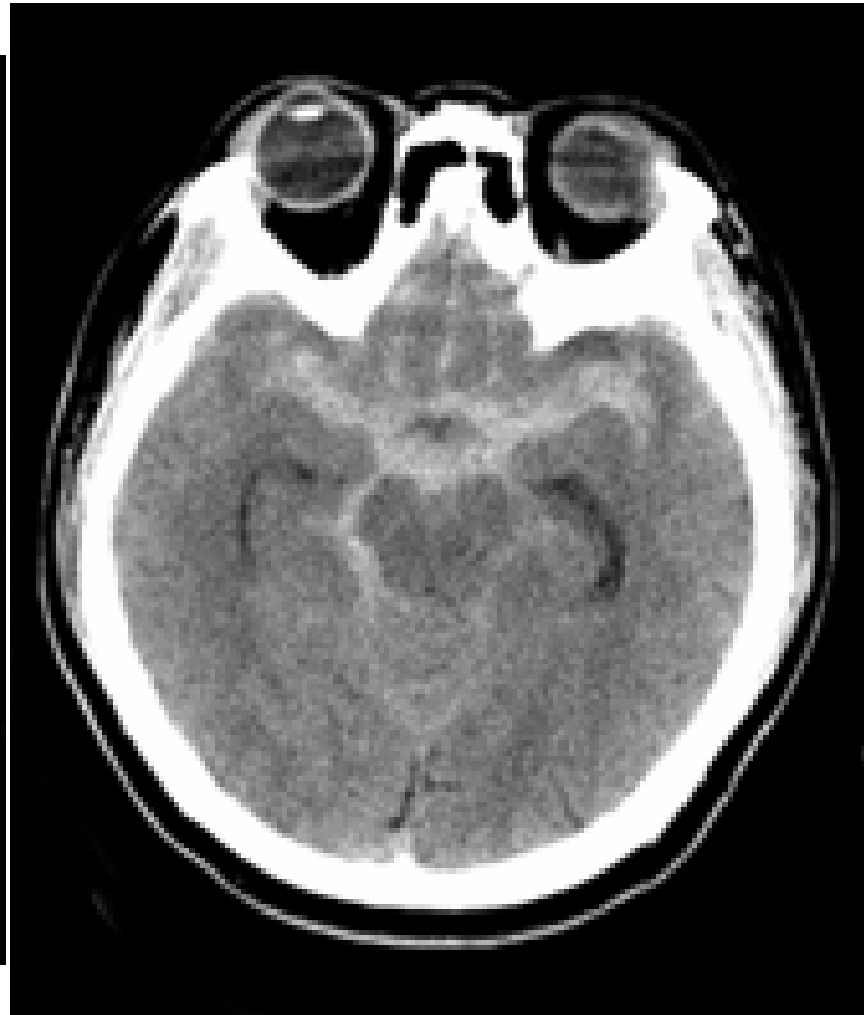
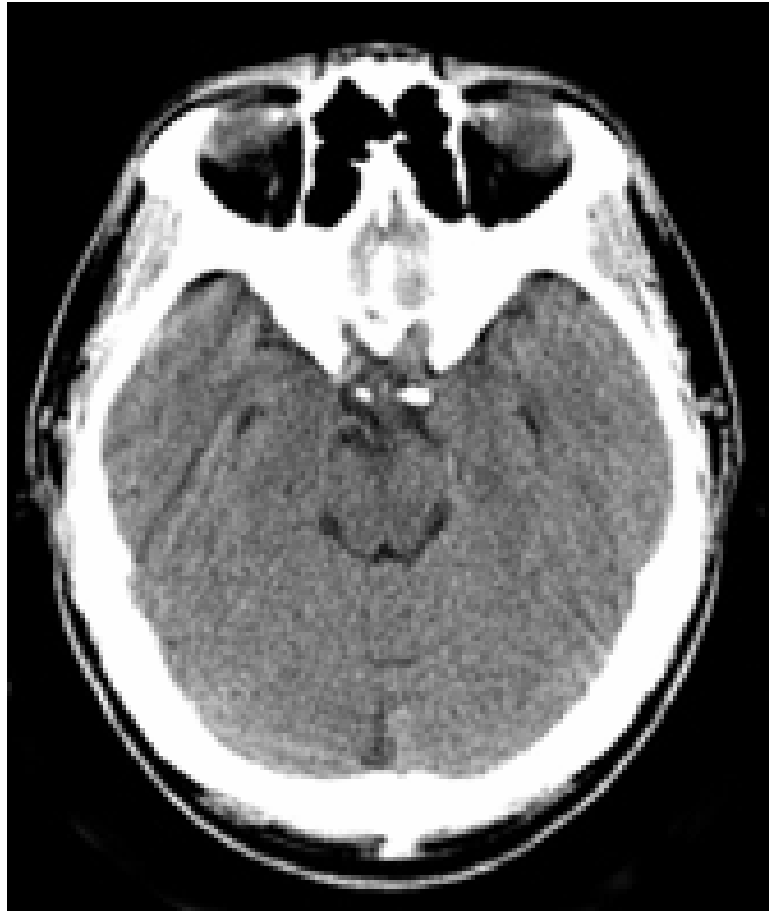
X線CT

CT Computed Tomographyの略。人体を透過したX線をコンピュータで計算し輪切りにした画像を撮影する検査

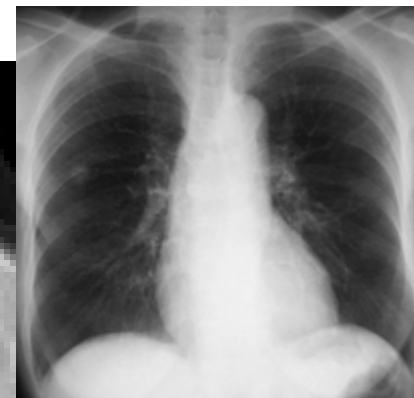
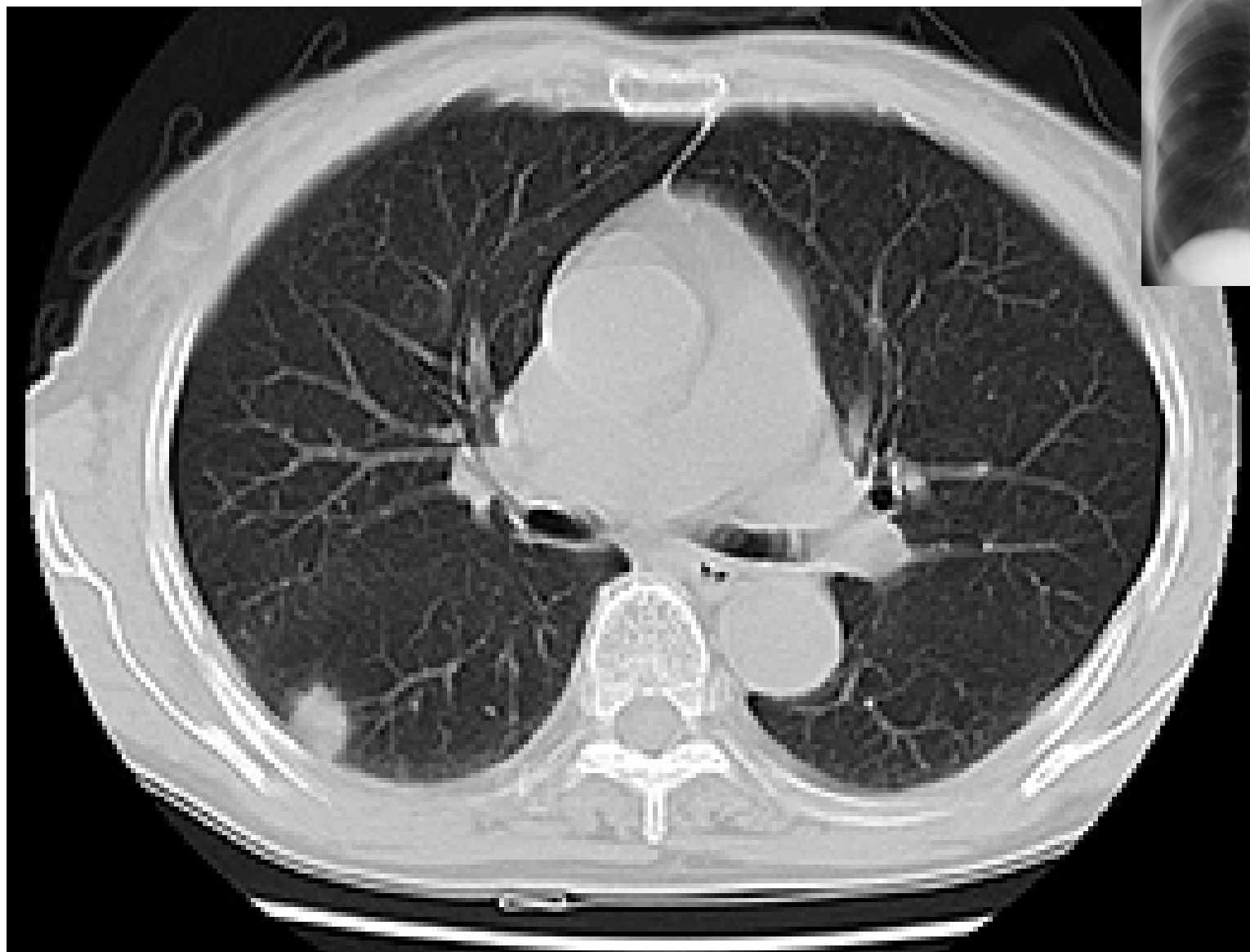


原理

人体の周りをX線管球(X線を出す機器)を回転させながら多方向から照射し、検出されたデータをコンピュータで計算して人体の輪切りの画像を出力します。X線管球と検出器は向かい合うように設置され、患者さんはこれらが本体の中にあるので見ることはできませんが、この間に患者さんを検査台に寝かせて調べたい部位にX線を照射しながら回転させることで輪切りの画像(断層像)を得ることができます。実際の画像は、骨の部分などはX線の吸収が大きいので白く見え、空気などの吸収が少ない部分は黒く見えます。たとえば脳内出血などの場合、漏出した血液は白く写りそれとは逆に脳梗塞などの血液が流れなくなった範囲は正常なところより黒く写ります。

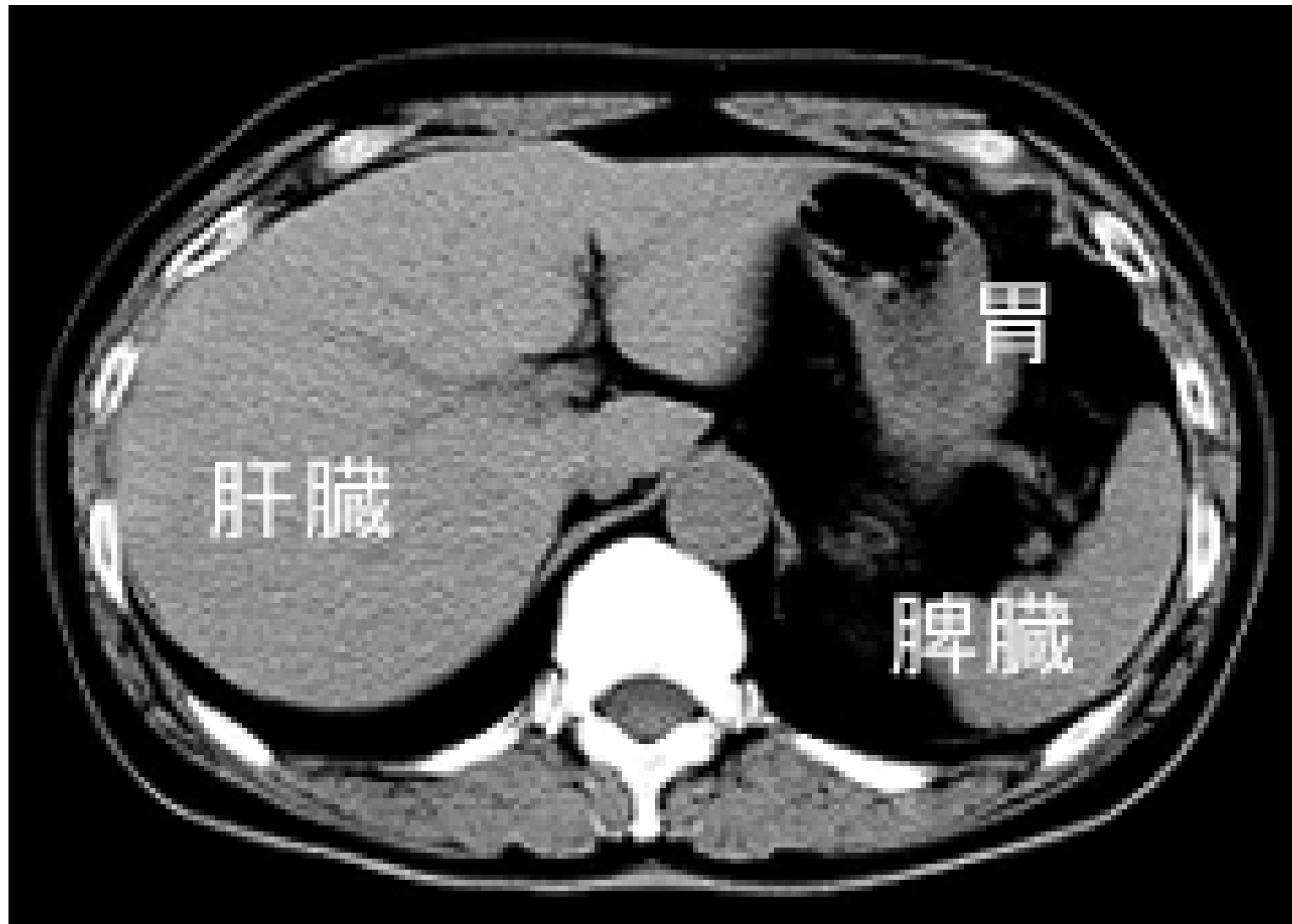


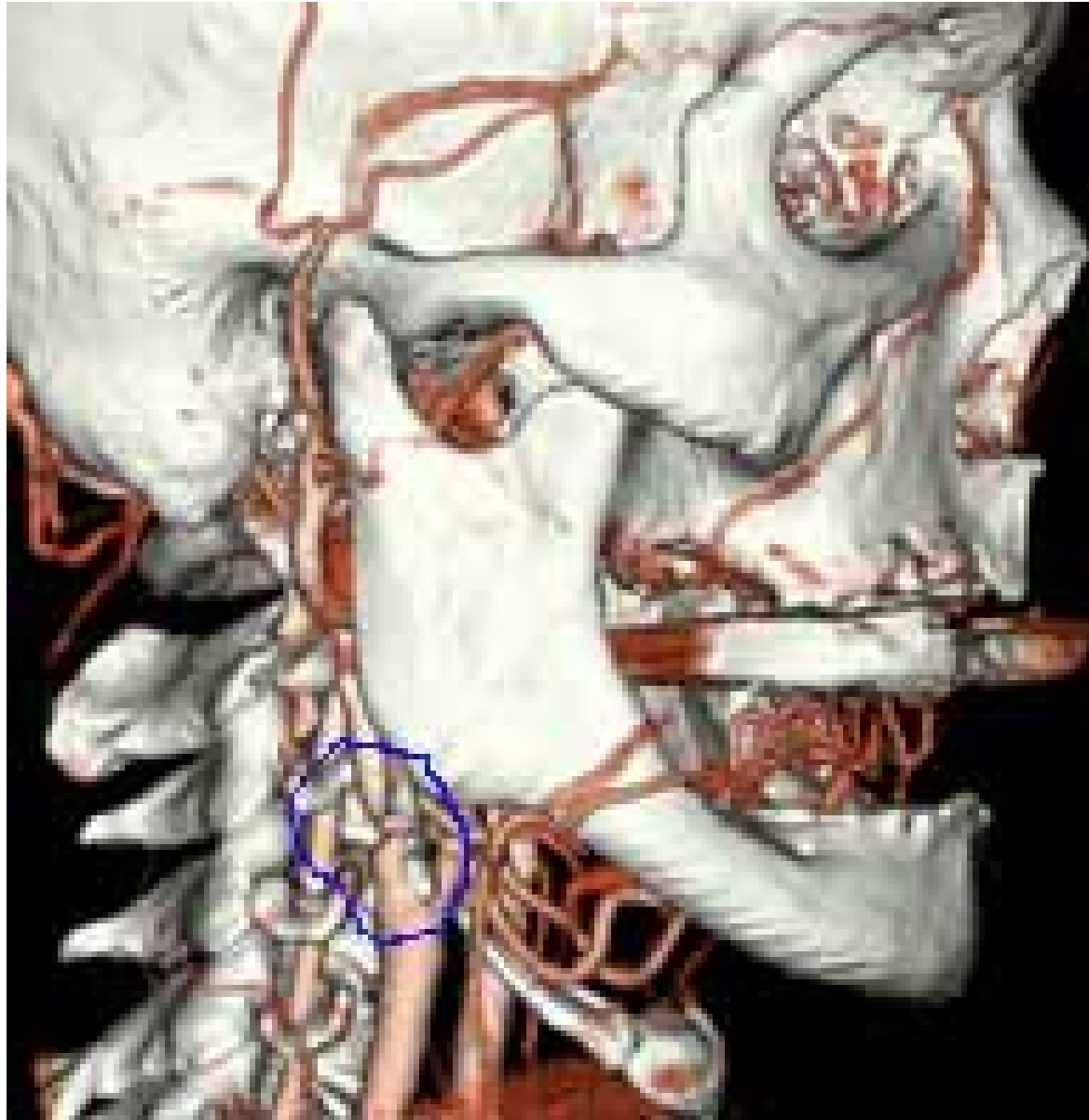
脑出血



胸部単純写真

胸部CT





右内頸動脈の狭窄

- X線の検出 : Photon counting, Scintillation Counters, Semiconductor Transducers, Counting Ratemeter, Pulse-Height Analyzers, Imaging Plate, CCD

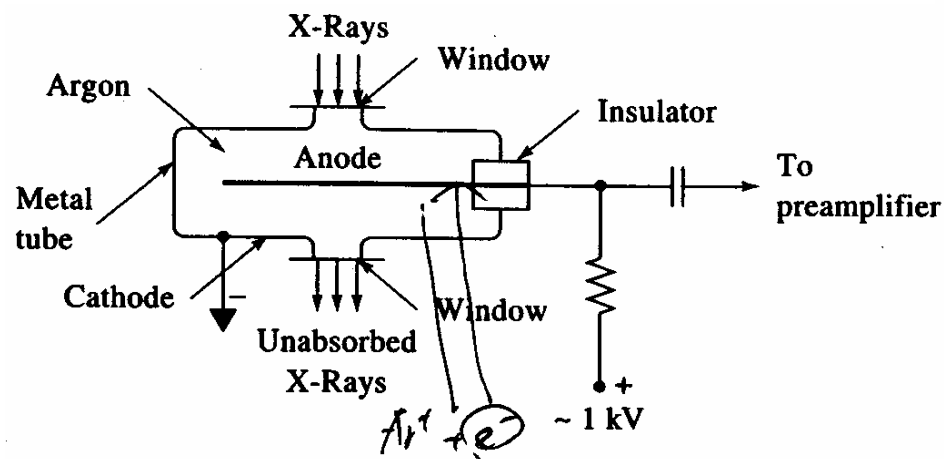


Figure 12-10 Cross section of a gas-filled detector.

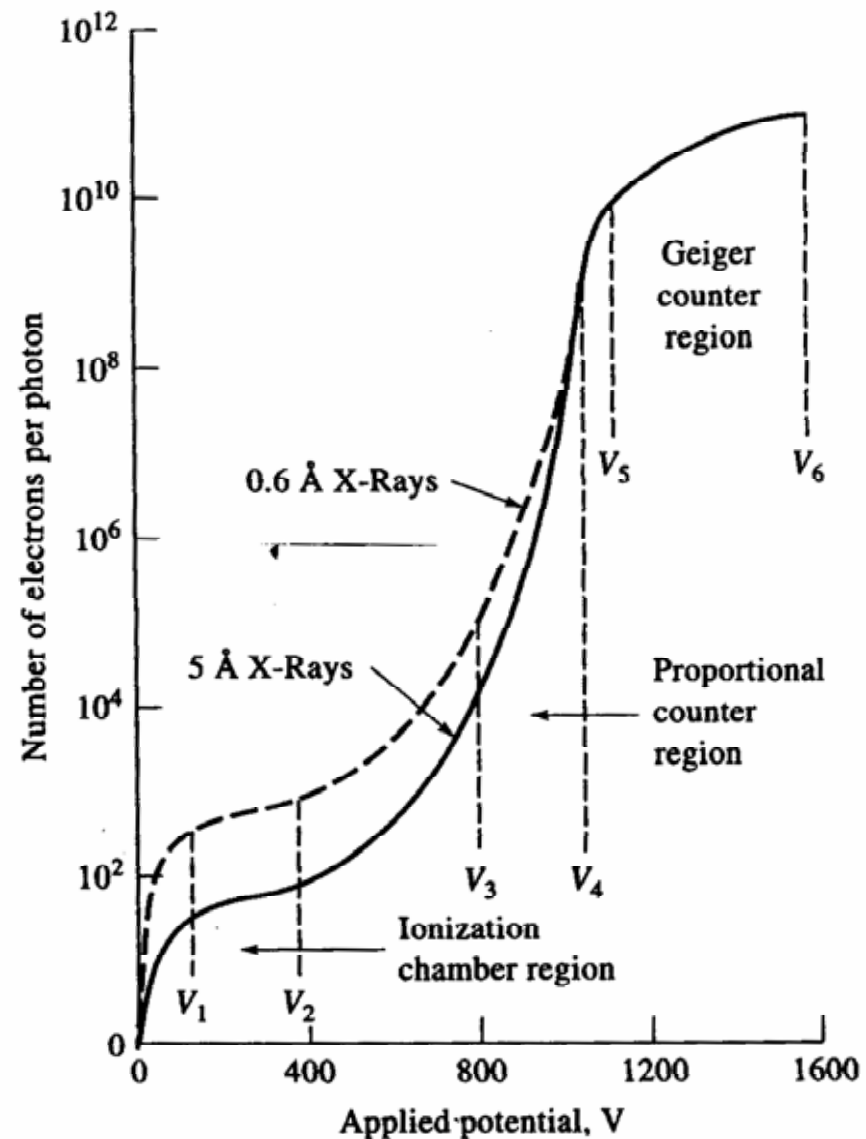


Figure 12-11 Gas amplification for various types of gas-filled detectors.

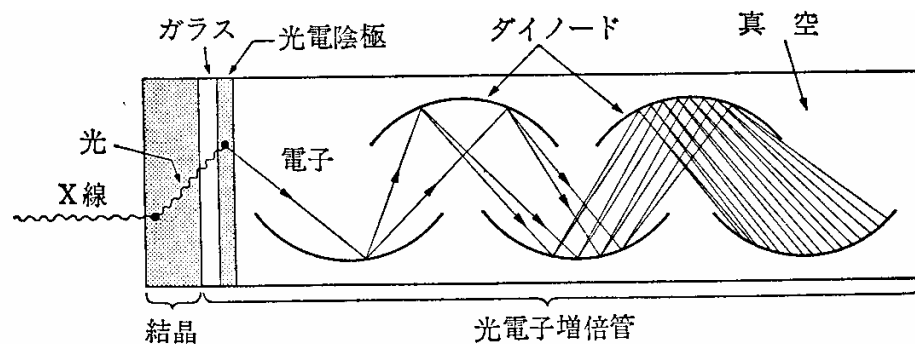


図 7-18 シンチレーションカウンター。電気回路は省略。

X線のエネルギー パルスの高さ

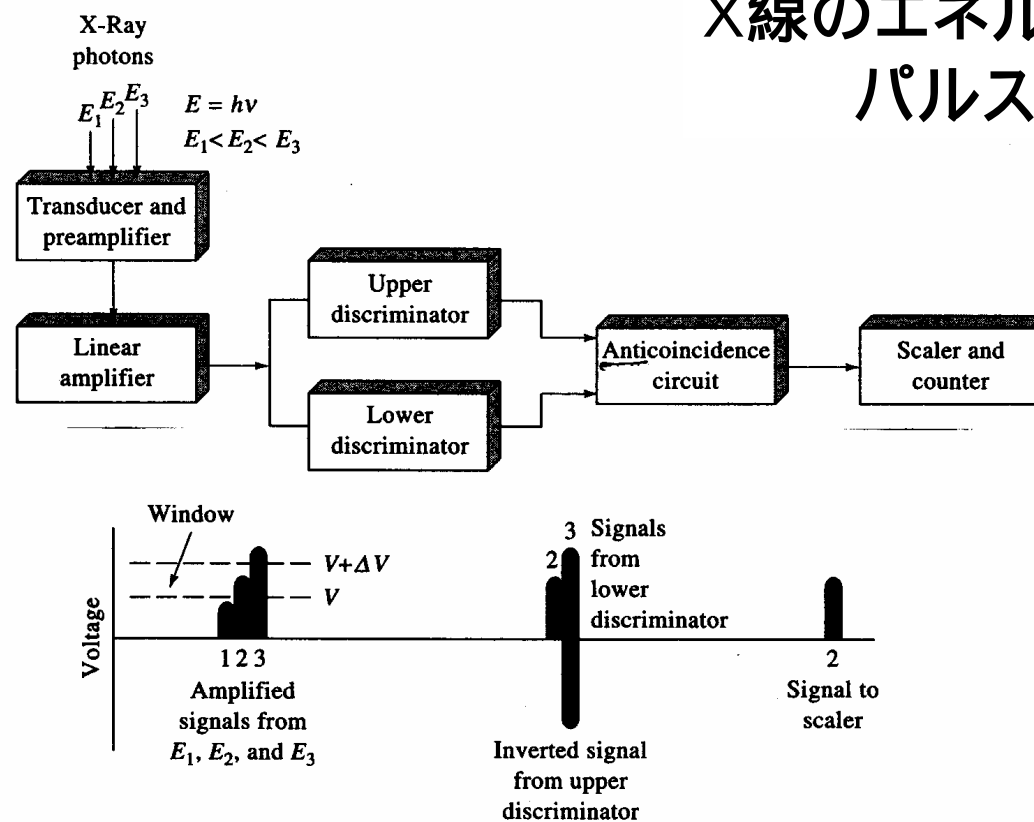
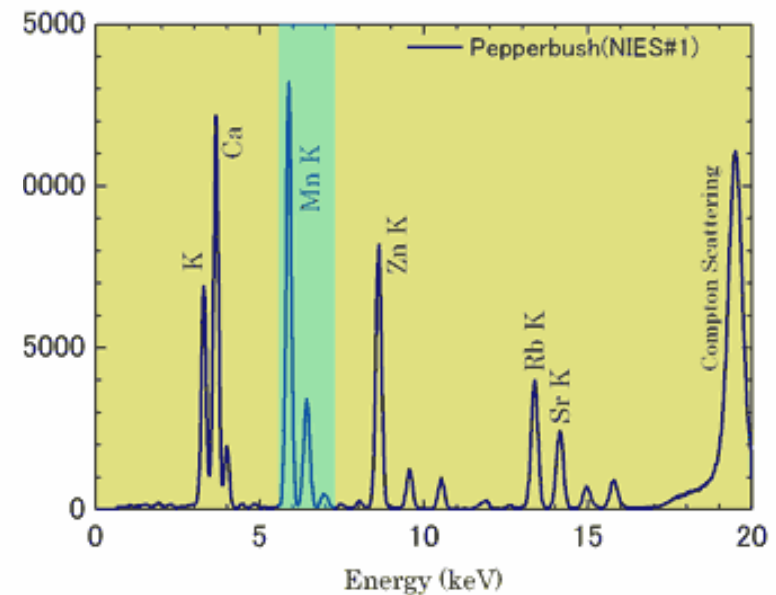
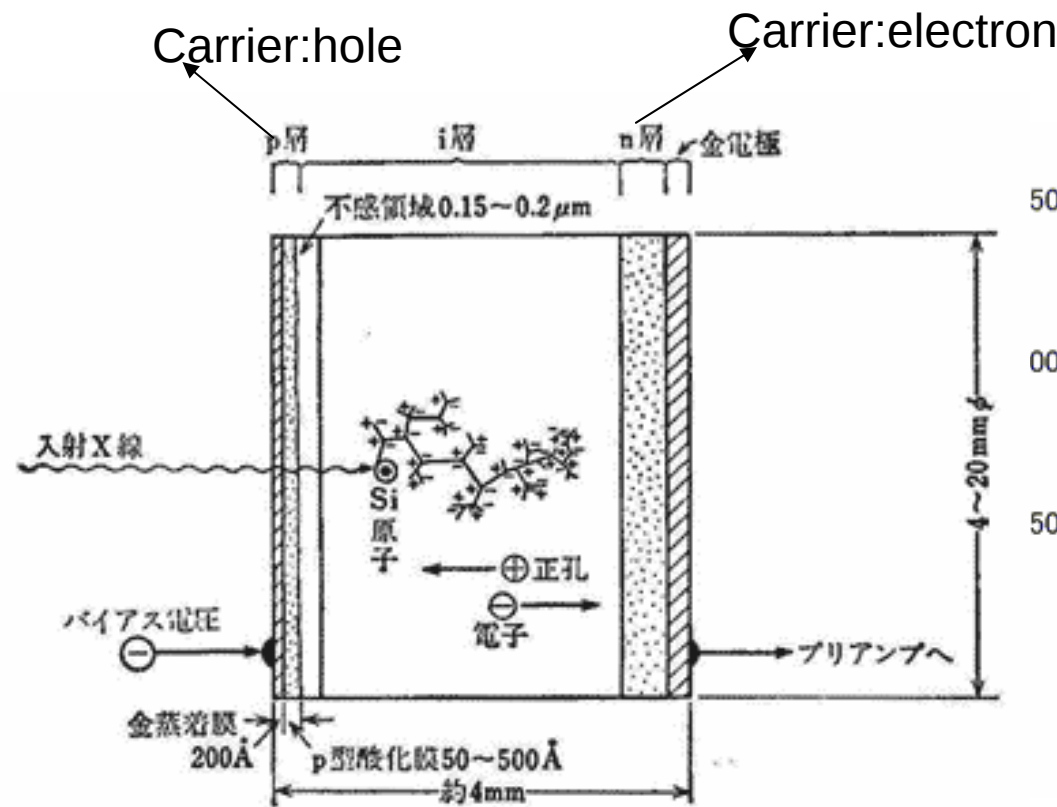
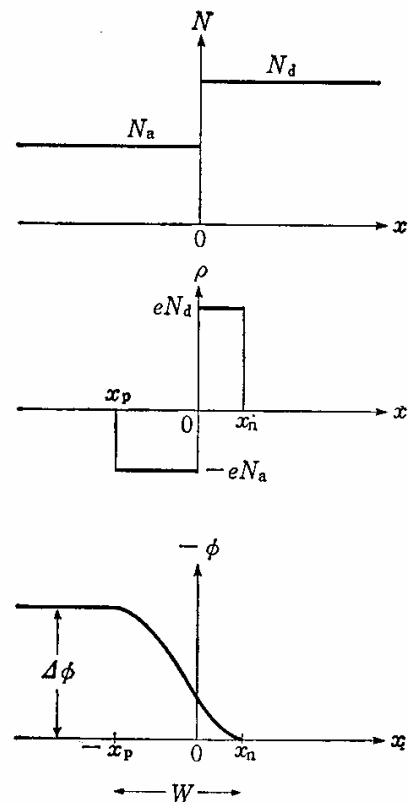


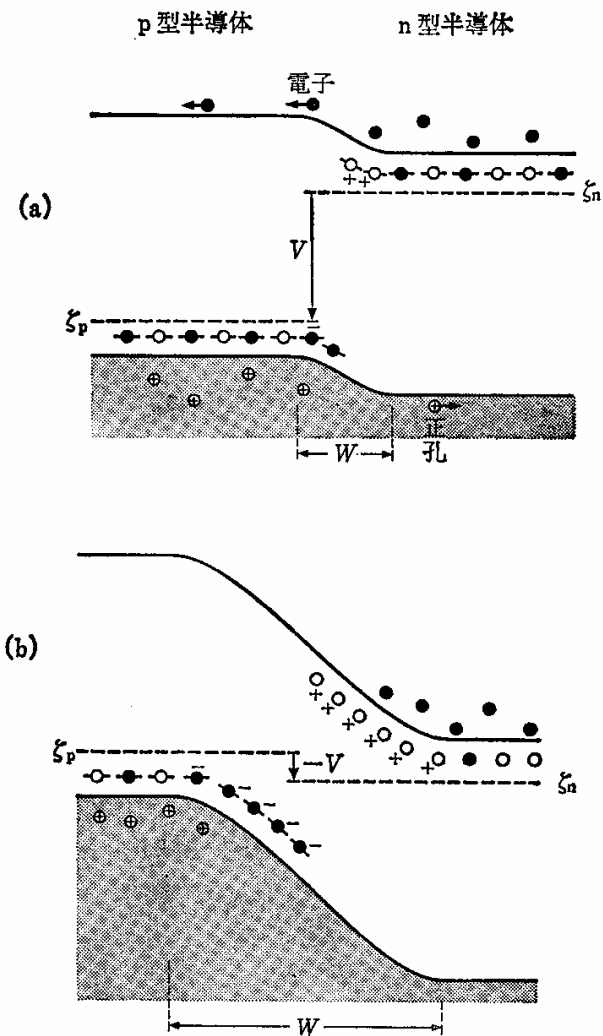
Figure 12-13 Schematic of a signal height selector. The lower discriminator rejects pulses below V only; the upper discriminator rejects pulses below $V + \Delta V$ and inverts the remaining pulse. Lower plot shows the transmitted pulse at the output of the anticoincidence circuit that is counted in this illustration.

Si(Li) 素子はp-i-n+構造のダイオードである。ダイオードは片方向にしか電流を流せず(整流作用がある)、電流が流れない方向に電圧をかけておき(逆バイアスする)その状態で光が入射すると禁制帯の電子が導電帯に励起され、励起された電子の分だけ電流が流れる。X線検出の場合、X線光子1個の入射に対応する電流パルス1個1個を測定する。1パルスの瞬間的な電流値は入射したX線のエネルギーに比例するので電流パルスの波高を測定することでX線のエネルギーが求められる。





pn 接合における不純物 N_a と N_d , 電荷密度 ρ , および電位 (ポテンシャル) ϕ の分布



(a) 順電圧をかけた pn 接合
(b) 逆電圧をかけた pn 接合

イメージングプレート

- IPは、医療用の高性能X線フィルムとして開発されたが、X線だけでなく、 α 線、 β 線、 γ 線、紫外線、重イオン線、中性子線(但し間接的)等あらゆる放射能に対して感度を有する。

IPを用いた放射能分布計測については、主に以下のような特徴が挙げられる。(武部, 1996)

- 1) 高感度
- 2) 広い測定範囲、直線性がよい
- 3) 広い測定エネルギー範囲
- 4) 高い空間分解能
- 5) 広い線量率特性
- 6) 高速読み出し可能
- 7) 消去し、再利用可能
- 8) 暗室、化学操作不要

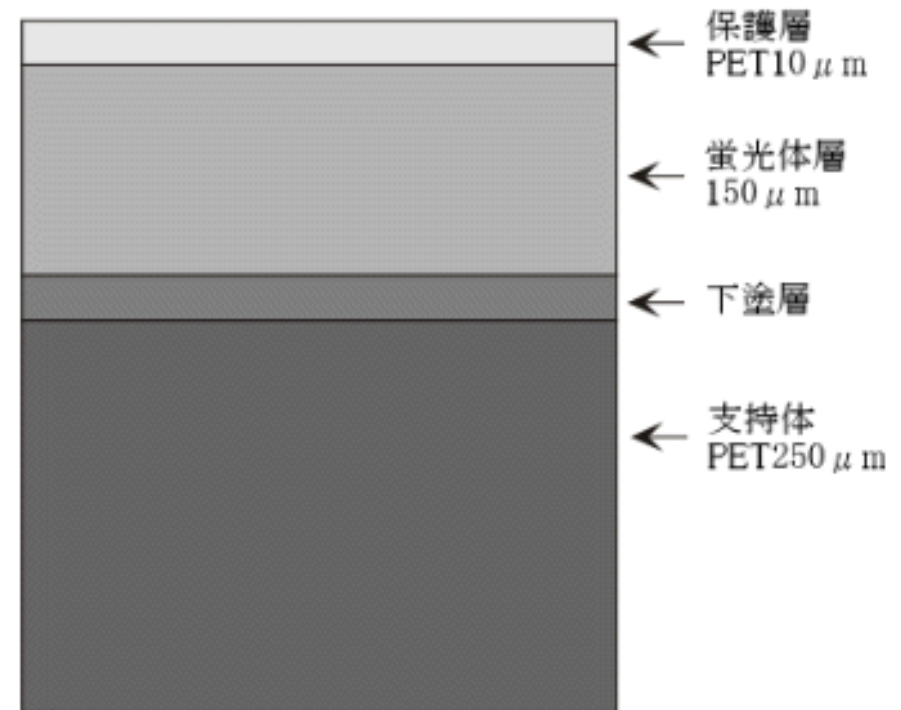


Fig.1-1 IP層構成図(BAS-SR)

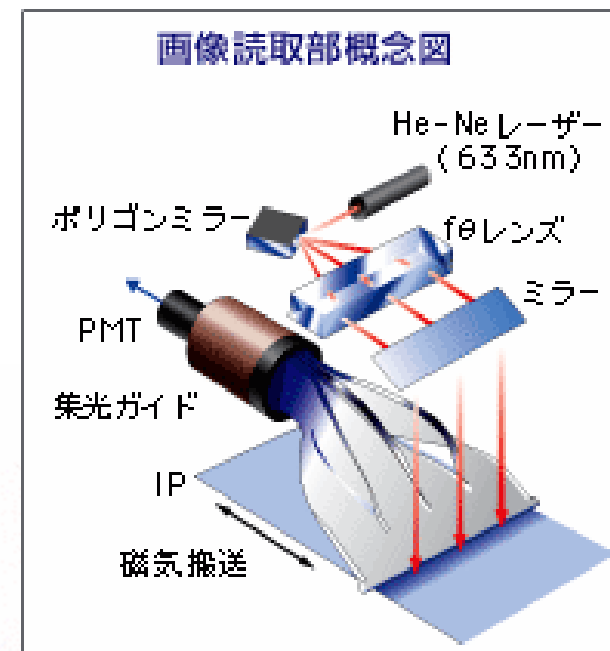
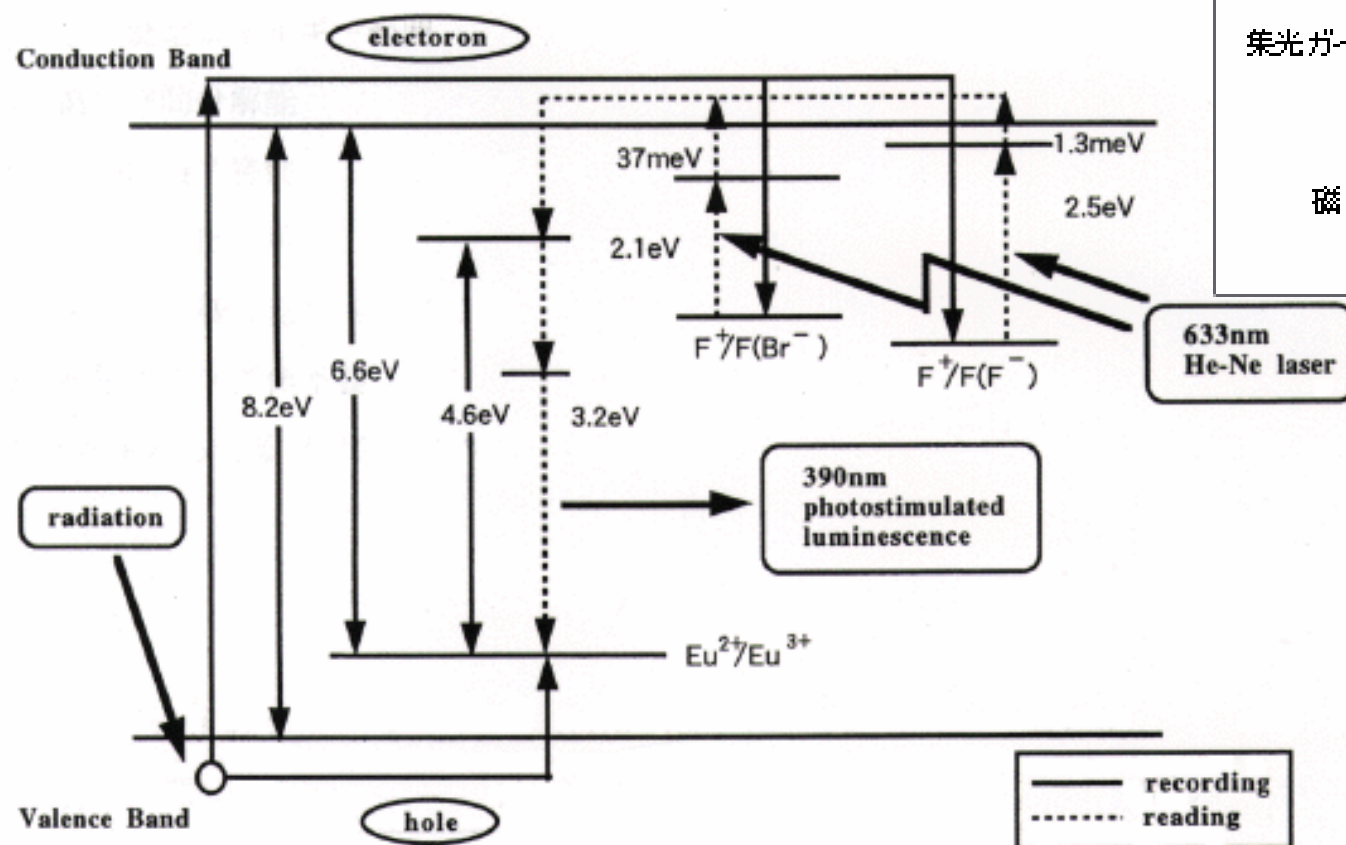
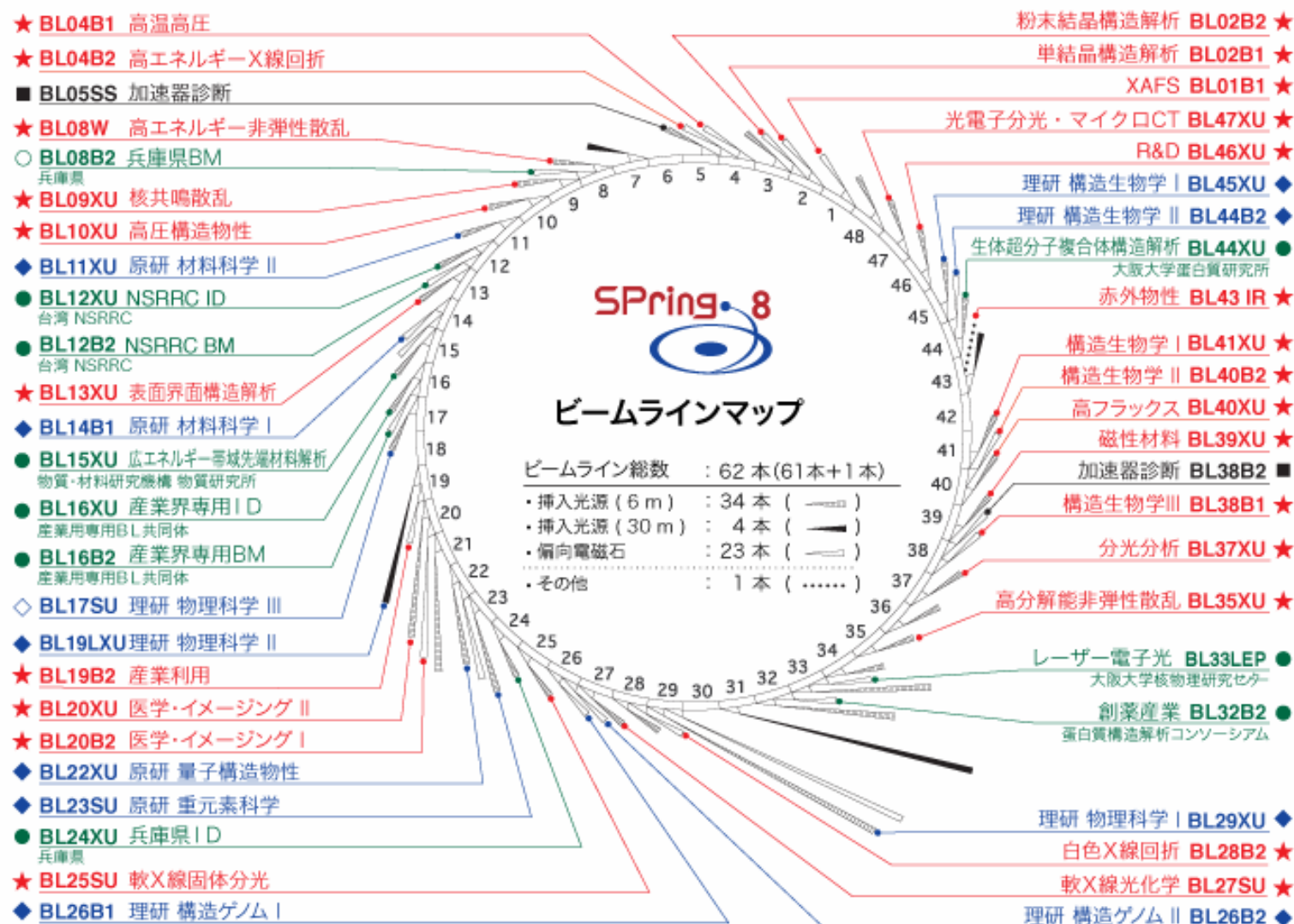


Fig.1-2 BaFBr:Eu²⁺輝尽性発光体のメカニズム(Iwabuchi et al., 1994)



BL : ビームライン
W : ウィグラー
B1, B2 : 偏向電磁石
IR : 赤外光
XU : X線アンジュレータ
LEP : レーザー電子光
SU : 軟X線アンジュレータ
LXU : 長尺アンジュレータ
SS : 直線部

★ : 共用ビームライン
● : 専用ビームライン
◆ : 原研、理研ビームライン
■ : 加速器診断



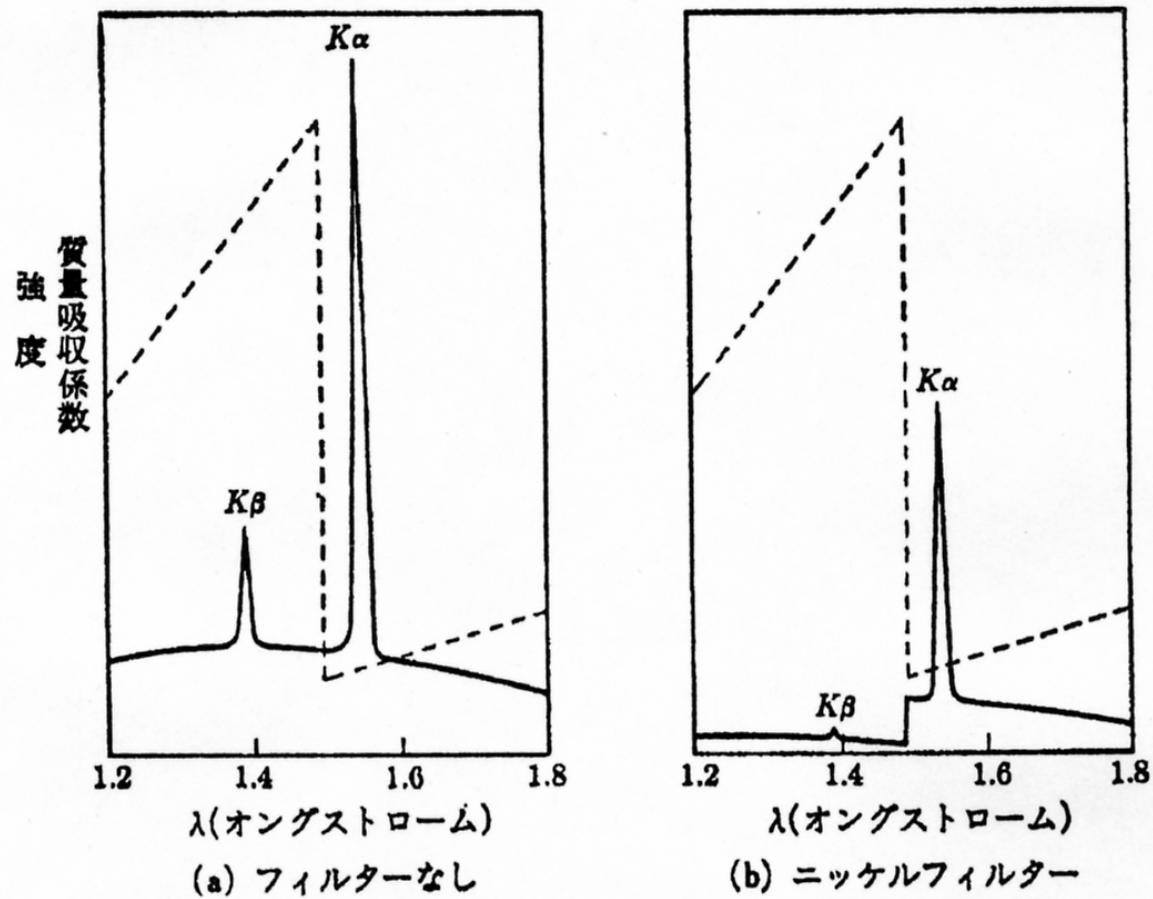


Fig. 3 ニッケルフィルターを通す前 (a) と、通した後 (b) の銅 X 線スペクトルの比較。点線は
ニッケルの質量吸収係数。

X線分光法

- 励起源 分光分析法
- X線 蛍光X線分析
- 電子線 EPMA
 電子プローブ 線マイクロアナライザー
- 荷電粒子(陽子) PIXE
 (Particle Induced X - ray Emission)

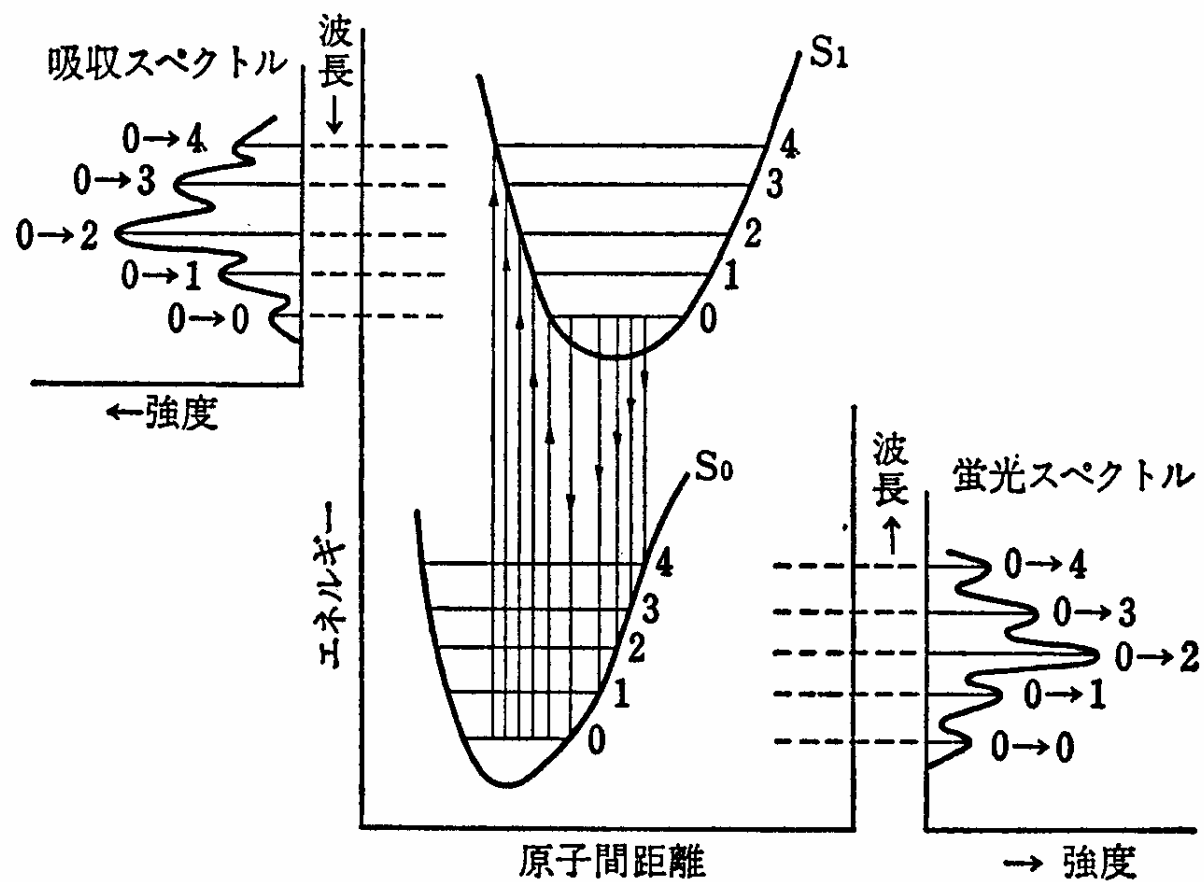
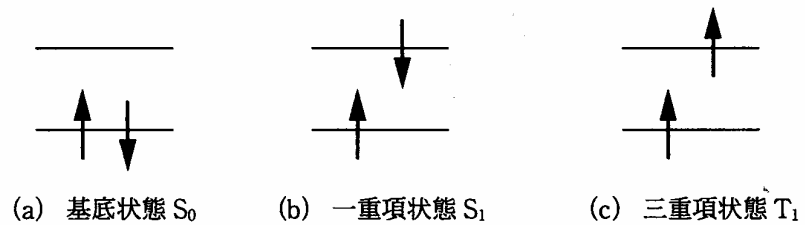
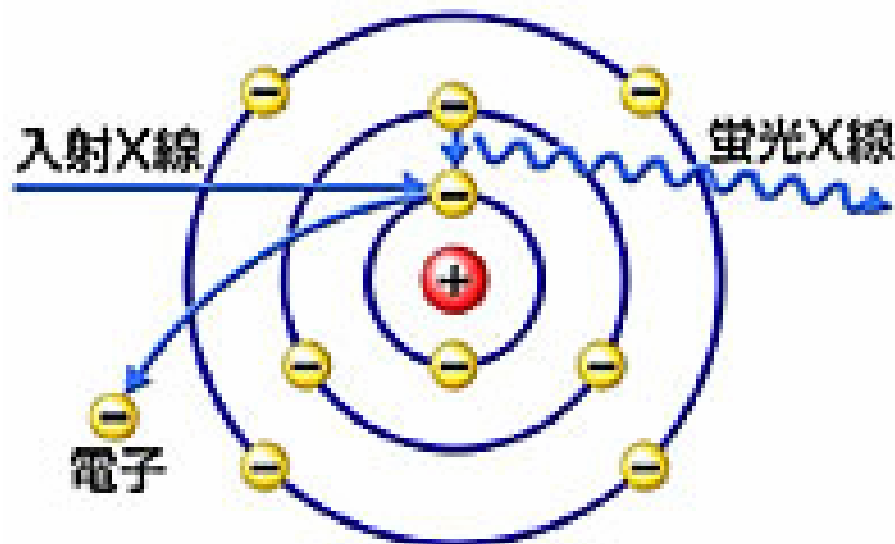


図 1.15 吸収スペクトルと蛍光スペクトル

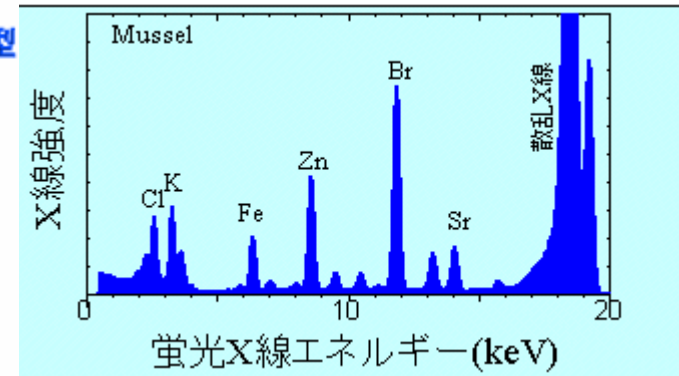
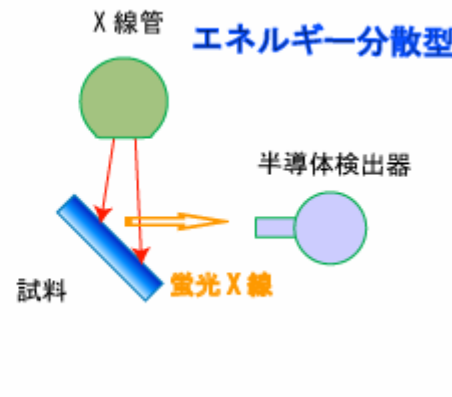
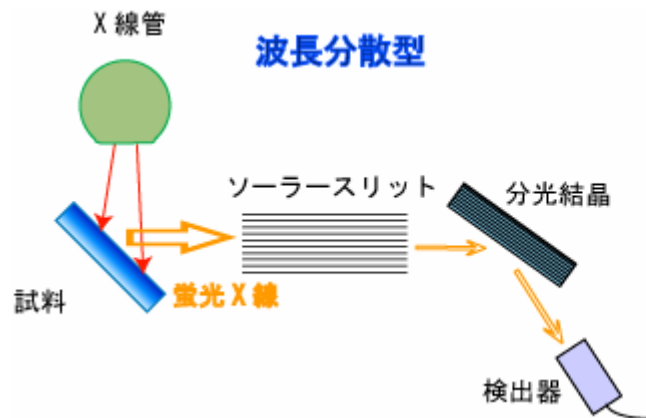


蛍光X線 (XRF: X-ray Fluorescence Analysis)



物質にX線をあてると、そのエネルギーによって、原子から電子が飛び出していきます。すると次に、空いた電子の席に、外側の軌道から別の電子が落ちていきます。その電子はエネルギーの高いところからエネルギーの低いところに移ったので、余分なエネルギーがX線として外へ出て行きます。このX線には元素によって波長が決まっているので、その波長を分析すれば、物質にどんな元素が含まれるかがわかります。またX線の強さをはかれば、元素の含有量を測ることもできます。

- 元素分析、(例 和歌山カレー事件)、
- 励起X線のエネルギー > 蛍光X線のエネルギー
- マトリックス効果(Matrix effects): 蛍光X線の強度が構成元素の濃度に比例しない。(Fig.)

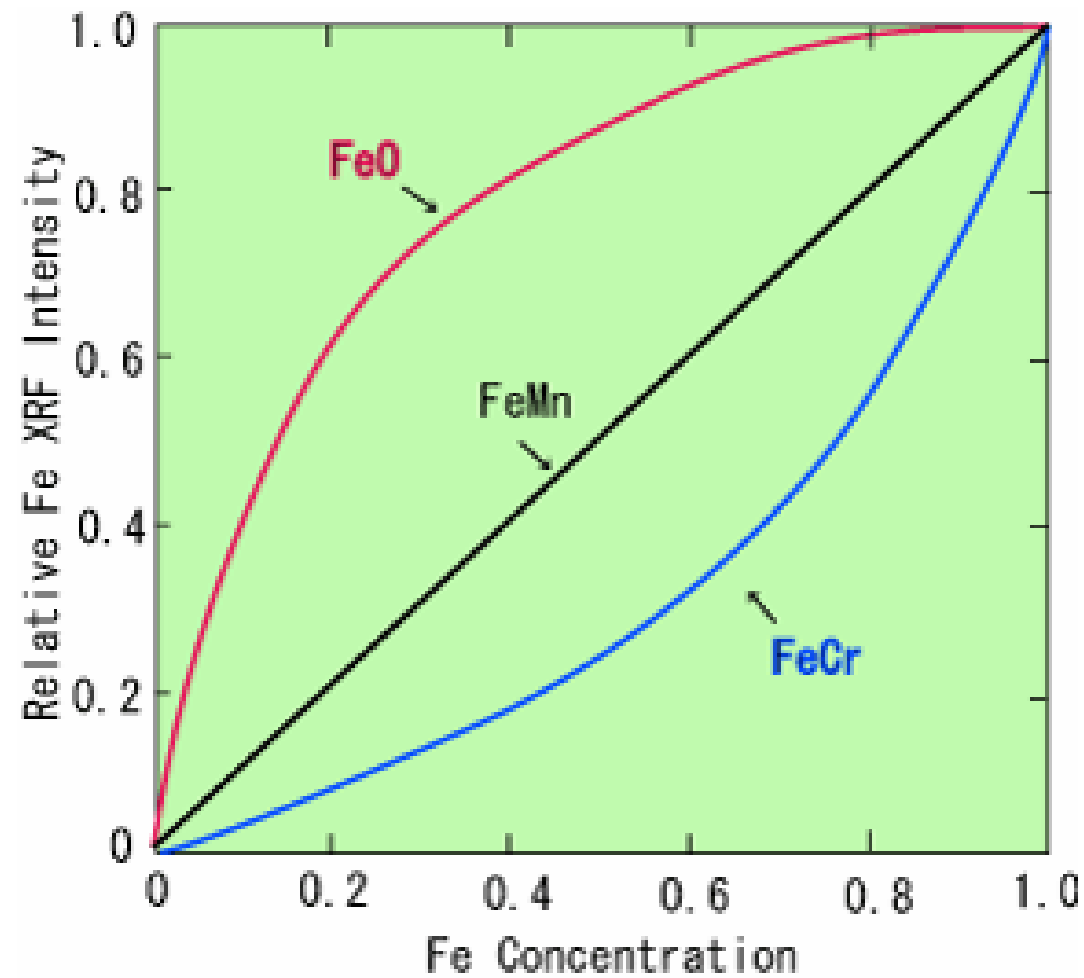


蛍光 線スペクトルには、制動放射による連続 線は生じないため、バックグラウンドの少ないスペクトルが得られる。

蛍光 線分析法の特徴

- (1) 一般に測定試料は化学的処理を必要とせず、また試料は測定により破壊されることがない。
- (2) 適用元素はNaからUまでの全元素であり、測定時間も一般に短い。また同時に多元素を分析することも可能である。
- (3) 分析可能な範囲は1ppm程度から100%までの広い濃度域をカバーし、しかも分析精度が高い。

マトリックス効果



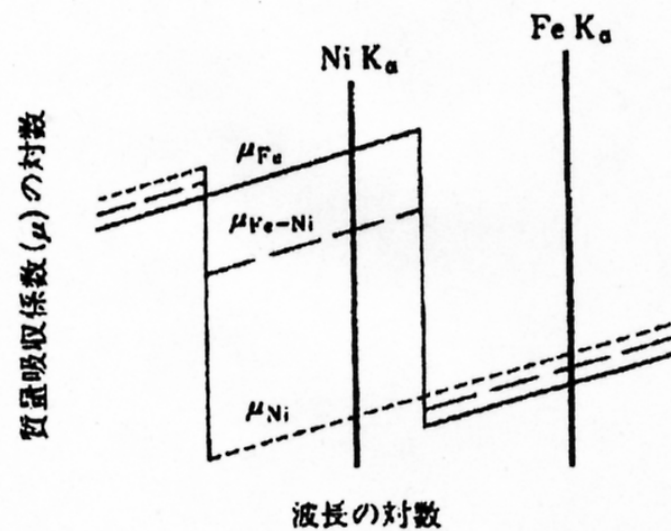


Fig. 4 Fe-Ni 合金の質量吸収係数と固有 X 線の関係

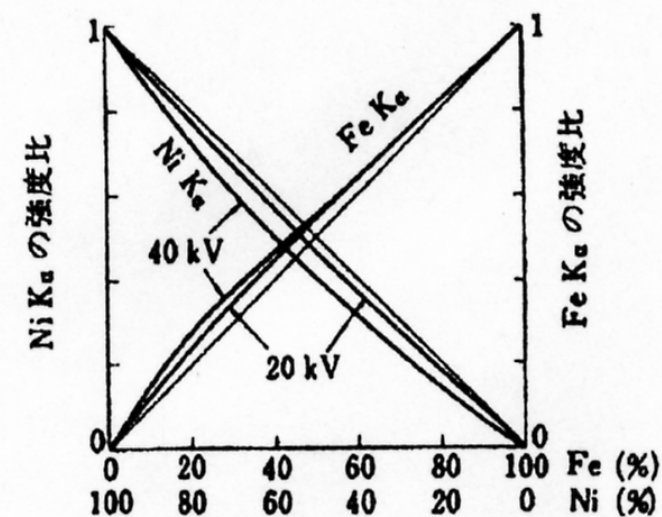
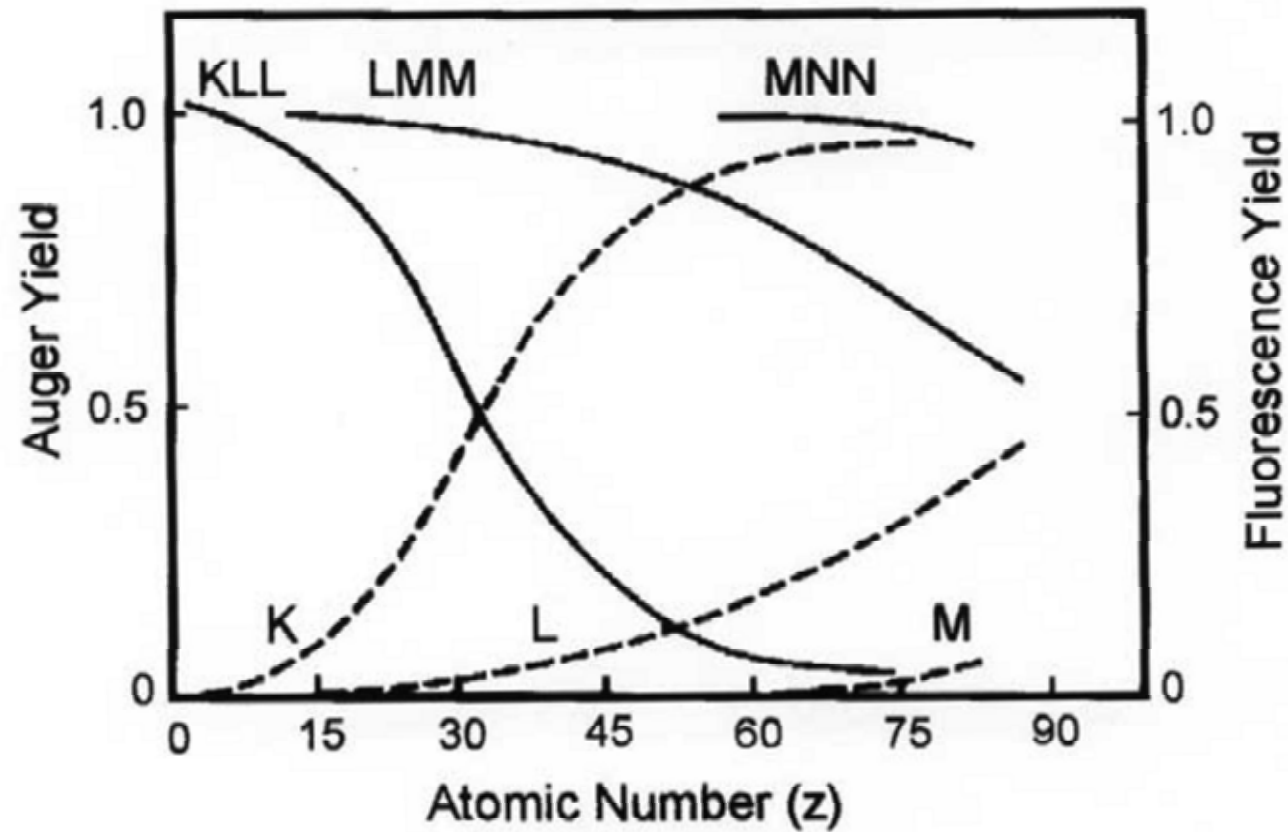


Fig. 5 蛍光 X 線の吸収励起効果

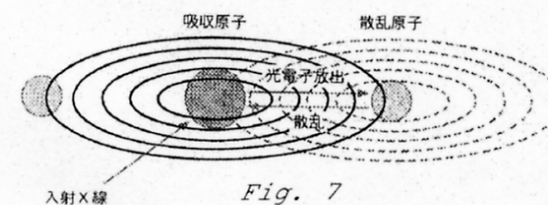
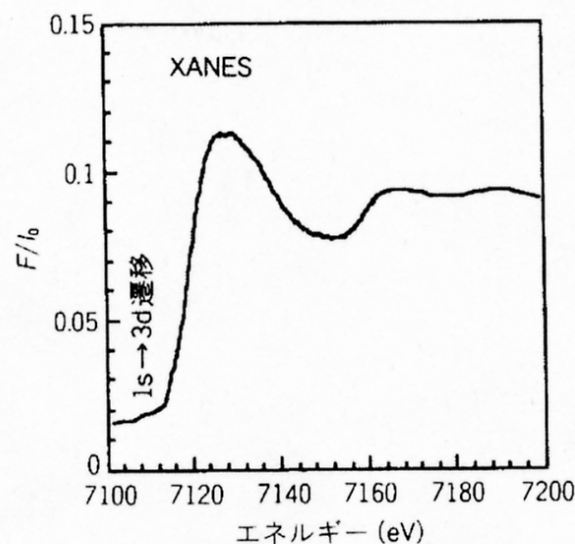
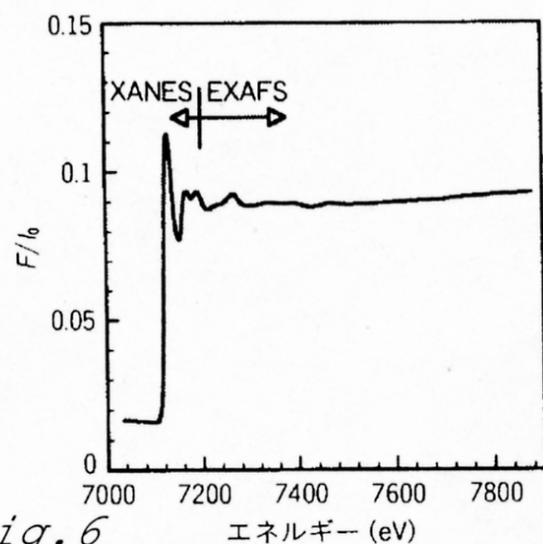
Competition between X-ray fluorescence and Auger electron emission



- 城、足立、飯塚「構造生物学とその解析法：第6章X線吸収分光法(1997共立)」より
- Fig.に示すようにX線吸収端から数100eVにわたって微細構造が現れる。
- XAFSは注目するエネルギー領域によって2つに分けられる。
- 吸収端から約50eV程度までに見られる微細構造を
XANES(X-ray
absorptionnearedgestructure),
- 約50eV以上のエネルギー領域の微細構造を
EXAFS(extendedX-rayabsorptioninestructure)と区別して
よび、それぞれ吸収原子の近傍構造に関して相補的な情報
を与える。

XANES(X-ray Asorption Near Edge Structure)

特性吸収端にごく近いエネルギー領域では、内殻電子は原子内のより高いエネルギーの束縛状態、あるいはイオン化準位のすぐ上の準連続状態に遷移する。どちらの状態も原子の配置やポテンシャルの変化に敏感であるので、XANESでは原子の価数など電子状態に関する情報が得られる。また多重散乱の効果もこの領域に観測され、XANESは、分子の対称性や結合角度などEXAFSとは相補的な構造情報を与える可能性をもっている。



- EXAFS(Extended X-ray Absorption Fine Structure)
- 特性吸収端より約50eV以上高エネルギーの領域では、X線を吸収した内殻電子はもはや原子内の束縛状態にとどまらず、核の束縛を離れて光電子として飛び出していく。このとき原子が孤立して存在している場合には光電子は発散していく球面波で記述され、スペクトルには微細構造は現われない。しかしFig.のように、近傍に他の原子が存在する場合には光電子が散乱されて戻ってくる確率が生じ、干渉の結果、遷移モーメントが変調されて微細構造が現われる。この微細構造は吸収原子の近傍にある原子の距離、個数、種類といった情報を含んでいる。

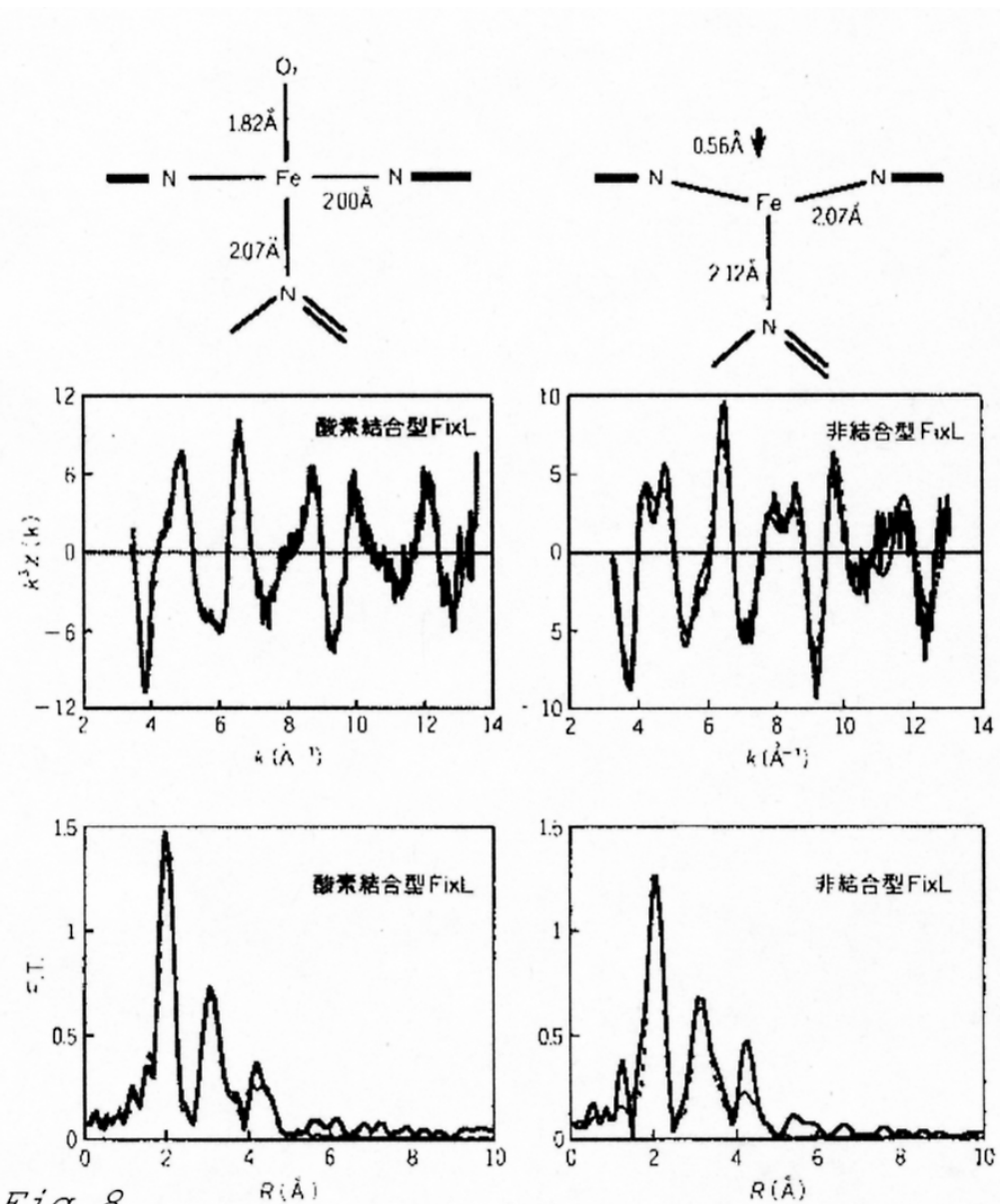


Fig. 8

図 5 酸素結合型と非結合型 FixL の EXAFS 振動とそのフーリエ変換 (F.T.: 動径分布関数) とそれらのカーブフィティングから求めた鉄-配位子結合距離

回折

X線の散乱 (•Rayleigh 散乱→Bragg's Law、Compton 散乱)

ゴニオメータ、モノクロメータ、 $\theta(sample) - 2\theta(detector)$,
4軸型 (detector 2θ , 3-axis sample, (ω, χ, ϕ axis))

powder/Rietveld analysis, single crystal/Laue diffraction

参考書

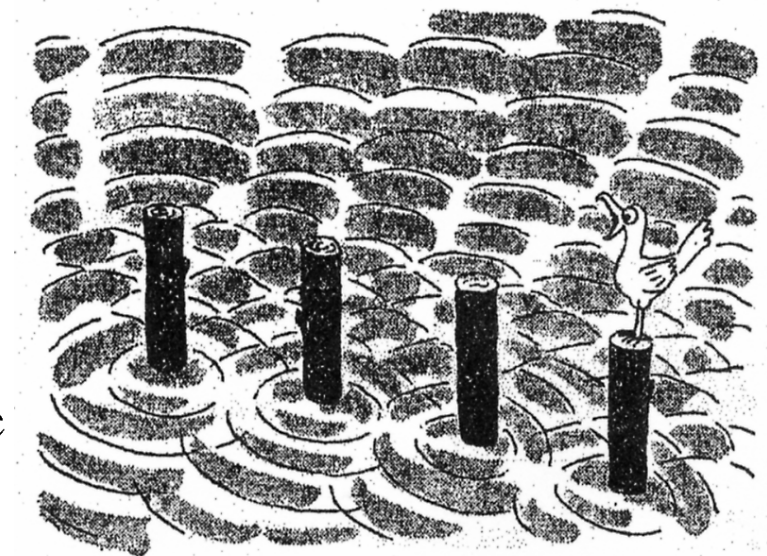
大場、矢野 編著 X線構造解析 (日本化学会編 1 2)
1999年 朝倉書店

カリティ X線回折要論 アグネ

C. Kittel, Introduction to Solid State Physics,
1996 Wiley Chap.1-2

フーリエの冒険

イメージ



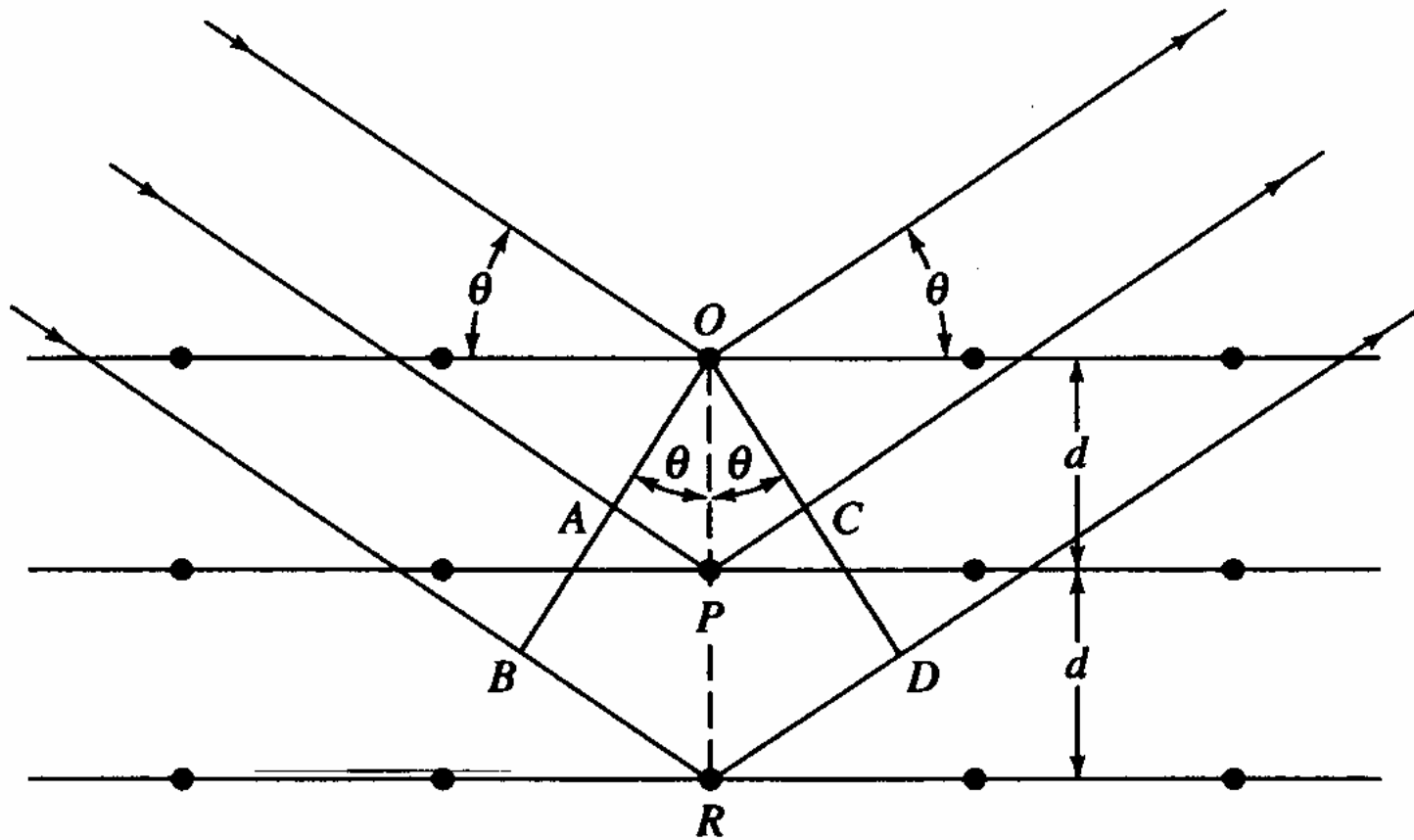


Figure 12-6 Diffraction of X-rays by a crystal.

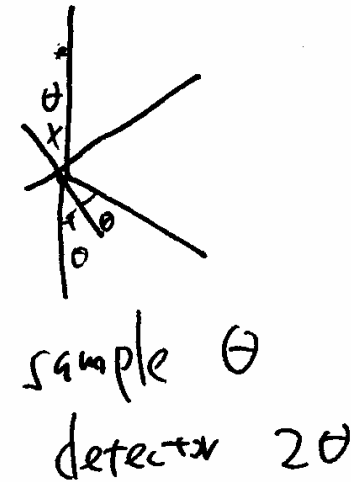
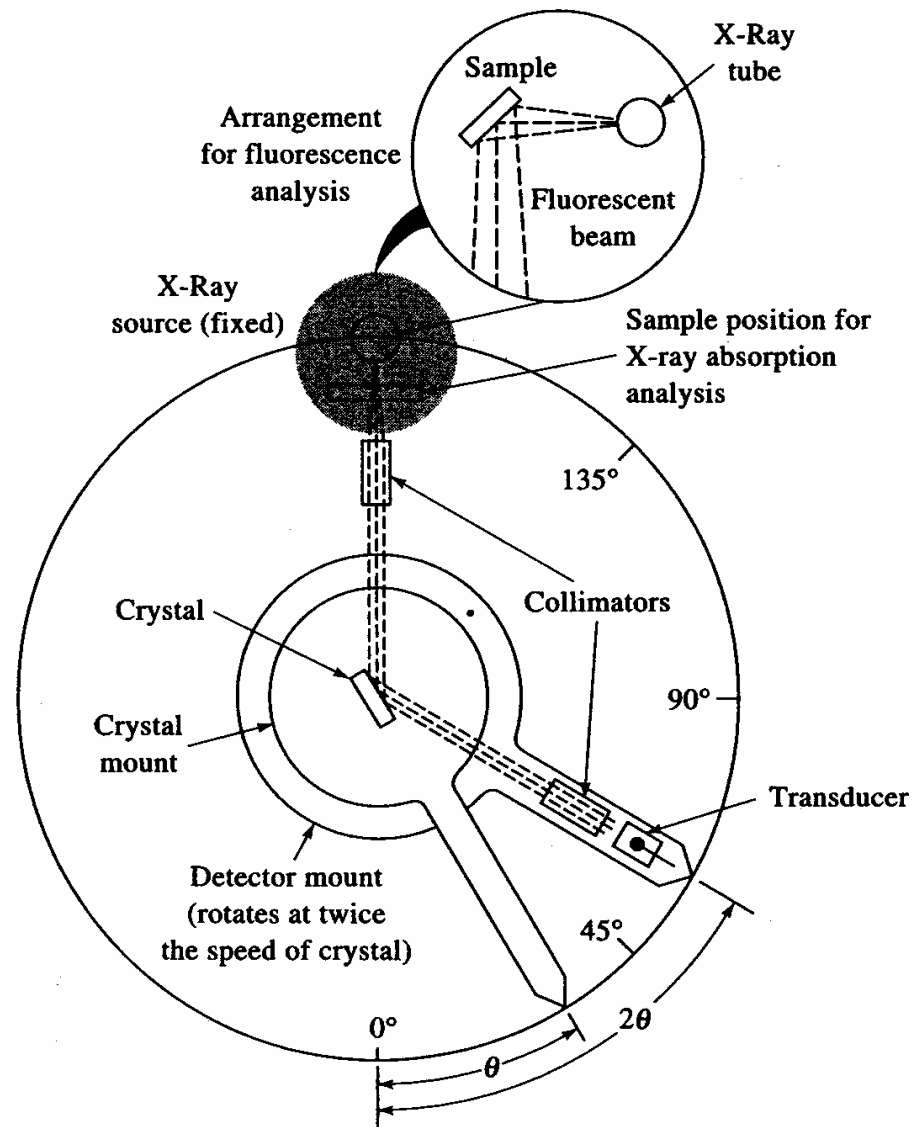


Figure 12-9 An X-ray monochromator and detector. Note that the angle of the detector with respect to the beam (2θ) is twice that of the crystal face. For absorption analysis, the source is an X-ray tube, and the sample is located in the beam as shown. For emission work, the sample becomes a fluorescent source of X-rays as shown in the insert.

Powder diffraction

Cone shape

Line

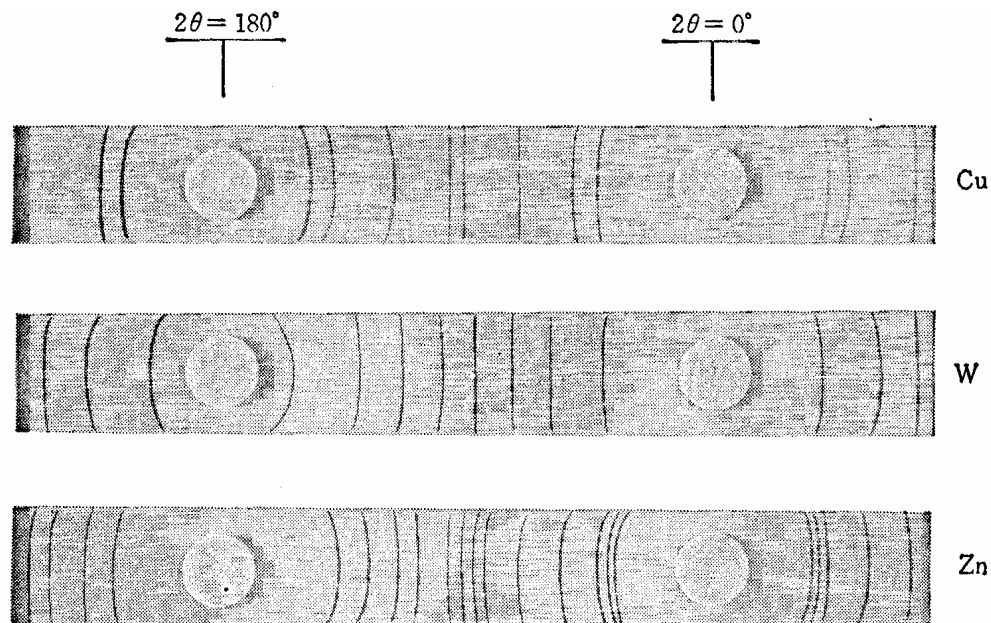
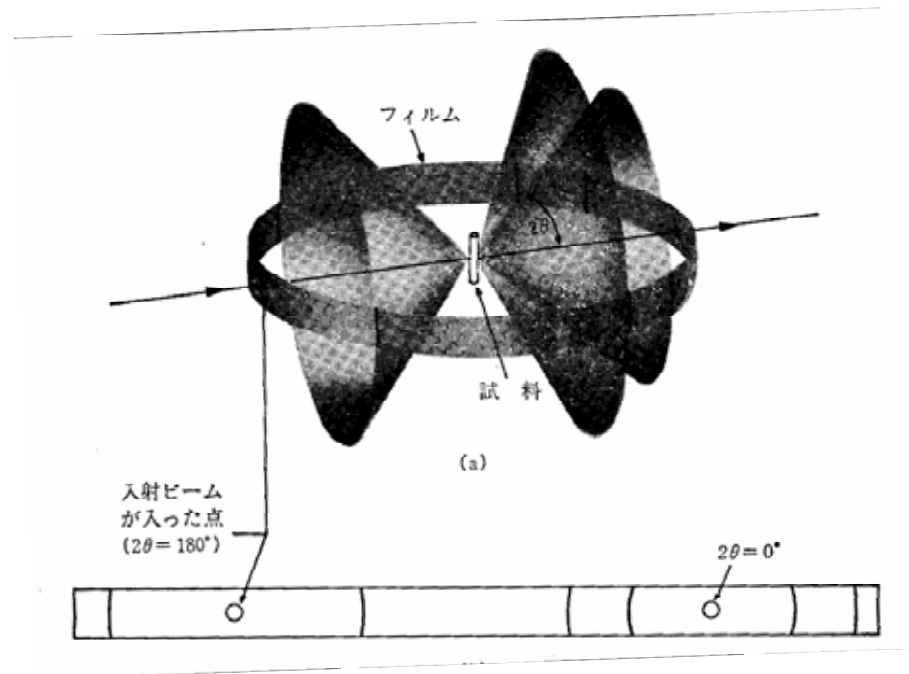


図 3-13 銅 (FCC), タングステン (BCC), 亜鉛 (HCP) の Debye-Scherrer 粉末図形. フィルターを通した銅 X 線を使用, カメラ半径=5.73 cm.

Diffraction from Single crystal

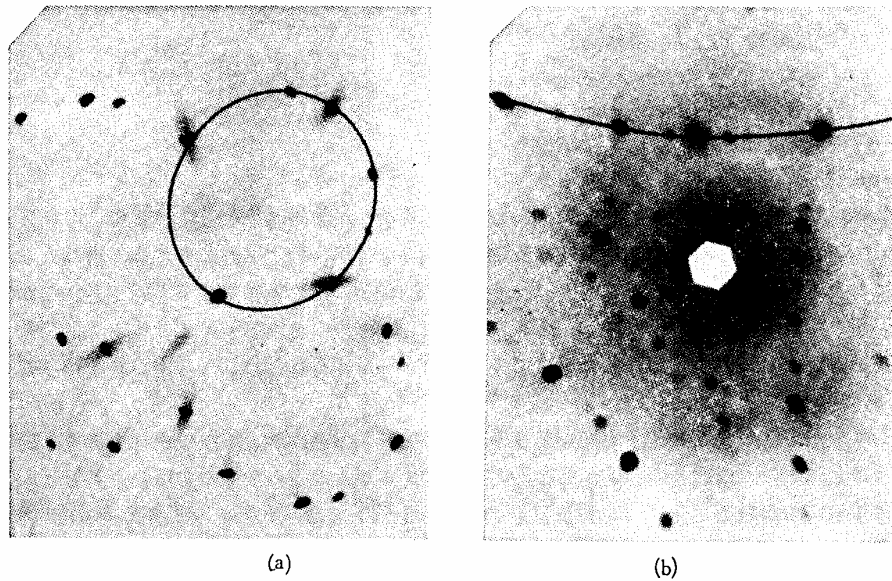


図 3-6 アルミニウム結晶（立方）の透過（a），および背面反射（b）Laue 図形。タンゲステンX線，30kV，19mA.

Diffracted beam

Spots

なぜspotになるのかは
来週詳しく述べます。

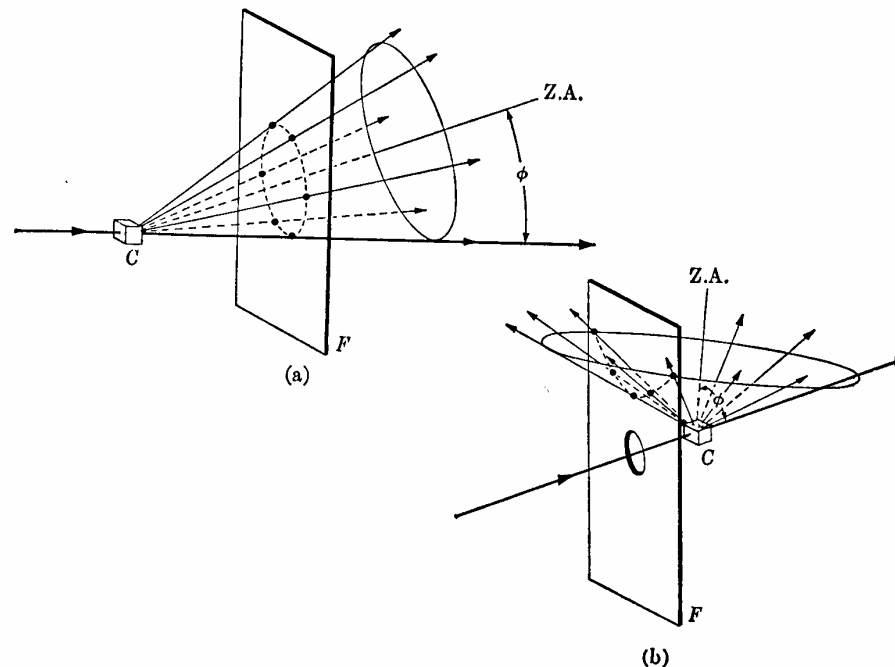


図 3-7 Laue 斑点の位置。(a) 透過法では楕円上に。(b) 背面反射法では双曲線上に (C=結晶，F=フィルム，Z.A.=晶帯軸)。

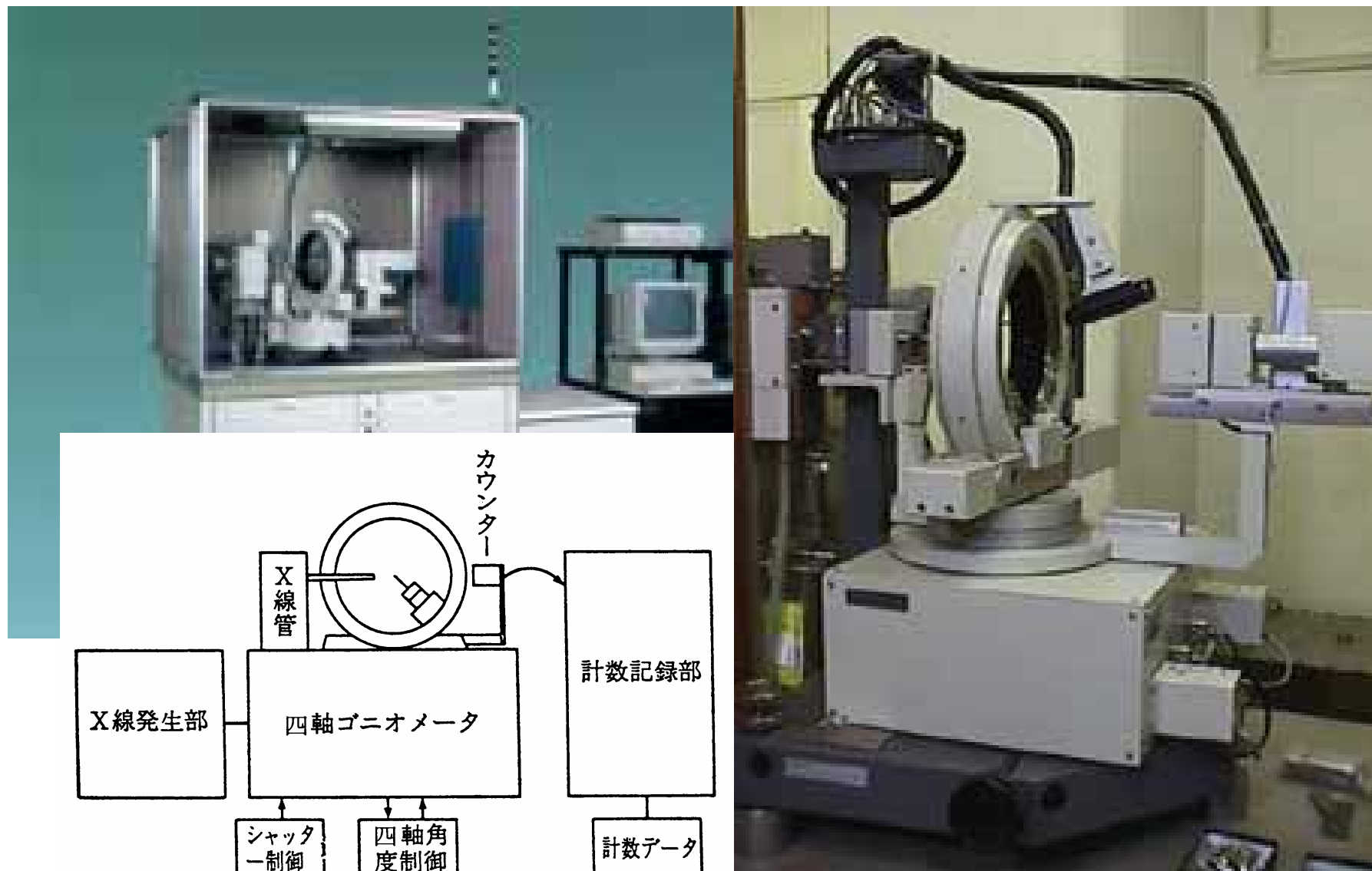
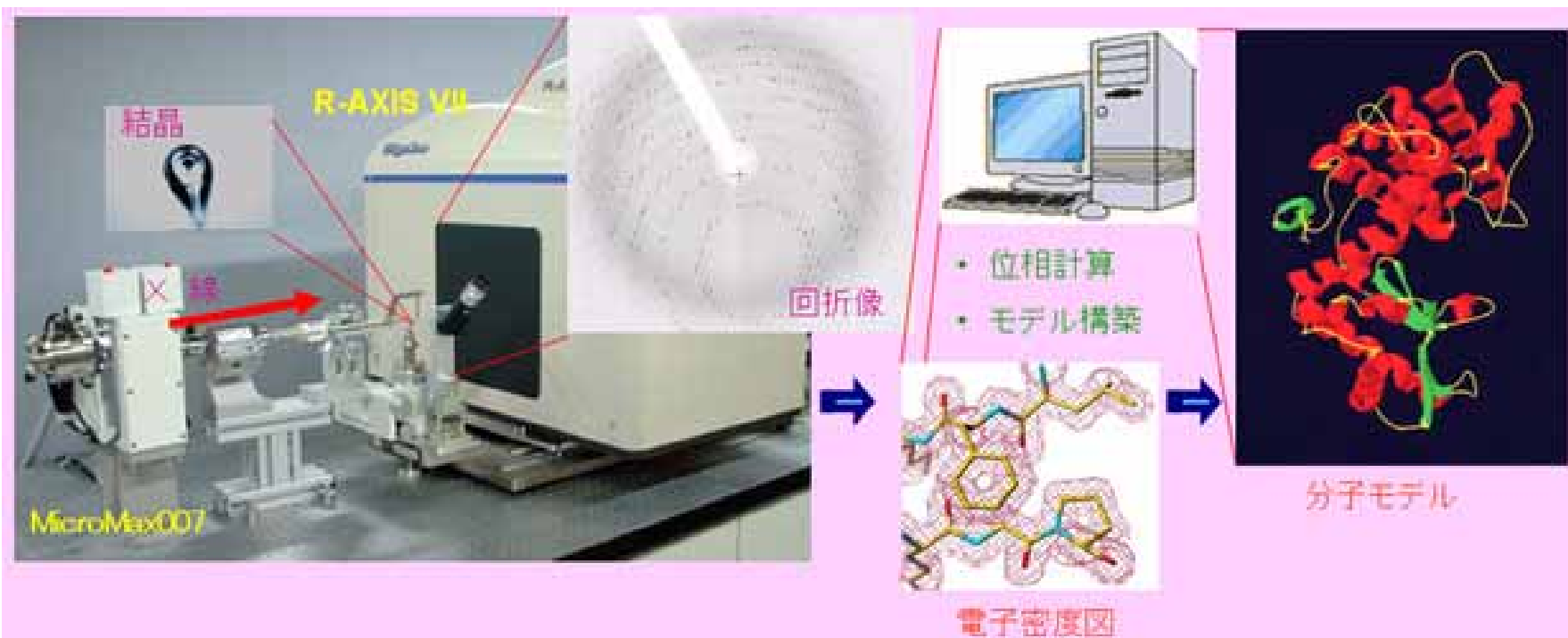


図 2.6 四軸型回折計構成図 (桜井, 1983)



Electron binding energies in eV for the elements in their natural forms Values compiled by [wyn Williams](#)

Element	K	L-I	L-II	L-III	M-I	M-II	M-III	M-IV	M-V	N-I	N-II	N-III
	1s	2s	2p1/2	2p3/2	3s	3p1/2	3p3/2	3d3/2	3d5/2	4s	4p1/2	4p3/2
12 Mg	1303.0+	88.6*	49.6+	49.21								
13 Al	1559.0	117.8*	72.9*	72.5*								
14 Si	1839	149.7*b	99.8*	99.2*								
19 K	3608.4*	378.6*	297.3*	294.6*	34.8*	18.3*	18.3*					
20 Ca	4038.5*	438.4+	349.7+	346.2+	44.3+	25.4+	25.4+					
21 Sc	4492	498.0*	403.6*	398.7*	51.1*	28.3*	28.3*					
22 Ti	4966	560.9+	460.2+	453.8+	58.7+	32.6+	32.6+					
23 V	5465	626.7+	519.8+	512.1+	66.3+	37.2+	37.2+					
24 Cr	5989	696.0+	583.8+	574.1+	74.1+	42.2+	42.2+					
25 Mn	6539	769.1+	649.9+	638.7+	82.3+	47.2+	47.2+					
26 Fe	7112	844.6+	719.9+	706.8+	91.3+	52.7+	52.7+					
27 Co	7709	925.1+	793.2+	778.1+	101.0+	58.9+	59.9+					
28 Ni	8333	1008.6+	870.0+	852.7+	110.8+	68.0+	66.2+					
29 Cu	8979	1096.7+	952.3+	932.7	122.5+	77.3+	75.1+					
30 Zn	9659	1196.2*	1044.9*	1021.8*	139.8*	91.4*	88.6*	10.2*	10.1*			
31 Ga	10367	1299.0*b	1143.2+	1116.4+	159.51	103.5+	100.0+	18.7+	18.7+			
32 Ge	11103	1414.6*b	1248.1*b	1217.0*b	180.1*	124.9*	120.8*	29.8*	29.2*			
40 Zr	17998	2532	2307	2223	430.3+	343.5+	329.8+	181.1+	178.8+	50.6+	28.5+	27.1+
41 Nb	18986	2698	2465	2371	466.6+	376.1+	360.6+	205.0+	202.3+	56.4+	32.6+	30.8+
42 Mo	20000	2866	2625	2520	506.3+	411.6+	394.0+	231.1+	227.9+	63.2+	37.6+	35.5+
43 Tc	21044	3043	2793	2677	544*	447.6*	417.7*	257.6*	253.9*	69.5*	42.3*	39.9*
44 Ru	22117	3224	2967	2838	586.1*	483.3+	461.5+	284.2+	280.0+	75.0+	46.3+	43.2+
45 Rh	23220	3412	3146	3004	628.1+	521.3+	496.5+	311.9+	307.2+	81.4*b	50.5+	47.3+
46 Pd	24350	3604	3330	3173	671.6+	559.9+	532.3+	340.5+	335.2+	87.1*b	55.7+a	50.9+
47 Ag	25514	3806	3524	3351	719.0+	603.8+	573.0+	374.0+	368.3	97.0+	63.7+	58.3+
48 Cd	26711	4018	3727	3538	772.0+	652.6+	618.4+	411.9+	405.2+	109.8+	63.9+a	63.9+a

Element	K	L-I	L-II	L-III	M-I	M-II	M-III	M-IV	M-V	N-I	N-II	N-III
	1s	2s	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	4s	4p _{1/2}	4p _{3/2}
50 Sn	29200	4465	4156	3929	884.7+	756.5+	714.6+	4g _{3.2} +	484.9+	137.1+	83.6+a	
83.6+a												
51 Sb	30491	4698	4380	4132	940+	812.7+	766.4+	537.5+	528.2+	153.2+	95.6+a	95.6+a
72 Hf	65351	11271	10739	9561	2601	2365	2107	1716	1662	538*	438.2+	380.7+
73 Ta	67416	11682	11136	9881	2708	2469	2194	1793	1735	563.4+	463.4+	400.9+
74 W	69525	12100	11544	10207	2820	2575	2281	1949	1809	594.1+	490.4+	423.61
75 Re	71676	12527	11959	10535	2932	2682	2367	1949	1883	625.4+	518.7+	446.8+
76 Os	73871	12968	12385	10871	3049	2792	2457	2031	1960	658.2+	549.1+	470.7+
77 Ir	76111	13419	12824	11215	3174	2909	2551	2116	2040	691.1+	577.8+	495.8+
78 Pt	78395	13880	13273	11564	3296	3027	2645	2202	2122	725.4+	609.1+	519.4+
79 Au	80725	14353	13734	11919	3425	3148	2743	2291	2206	762.1+	642.7+	546.3+
80 Hg	83102	14839	14209	12284	3562	3279	2847	2385	2295	802.2+	680.2+	576.6+
81 Tl	85530	15347	14698	12658	3704	3416	2957	2485	2389	846.2+	720.5+	609.5+
82 Pb	88005	15861	15200	13035	3851	3554	3066	2586	2484	891.8+	761.9+	643.5+
83 Bi	90526	16388	15711	13419	3999	3696	3177	2688	2580	939+	805.2+	678.8+