

Diffrattometria X

Scoperta dei Raggi X: Roentgen 1895.

Applicazione RX minerali: Max von Laue 1912.

Determinazione struttura cristallina: Bragg, 1914.

RX: radiazioni elettromagnetiche con λ corte attorno all'Å.

$$E = h \nu = hc / \lambda$$

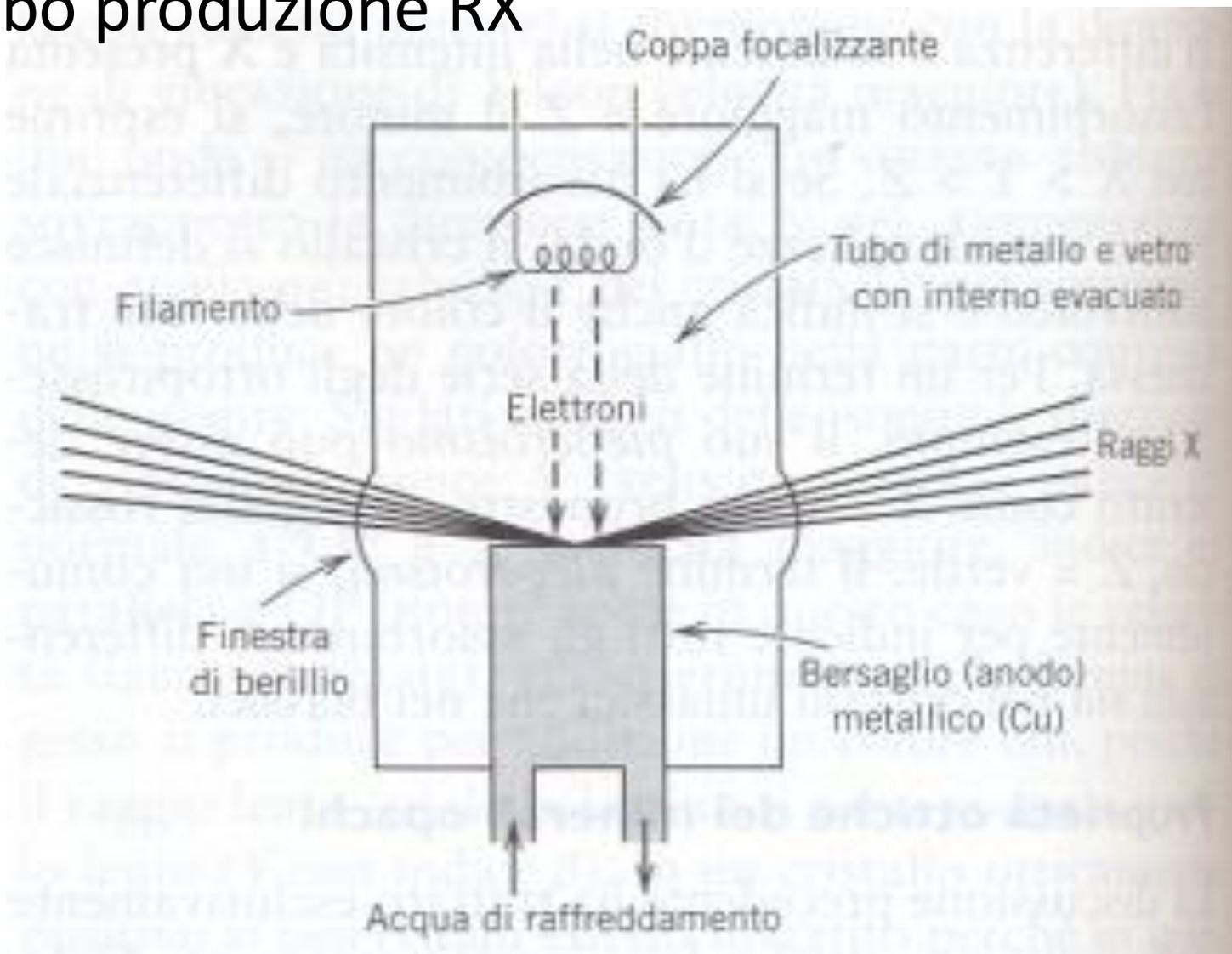
ν = frequenza

h = costante di Plank ($6.62618 \cdot 10^{-34}$ Js)

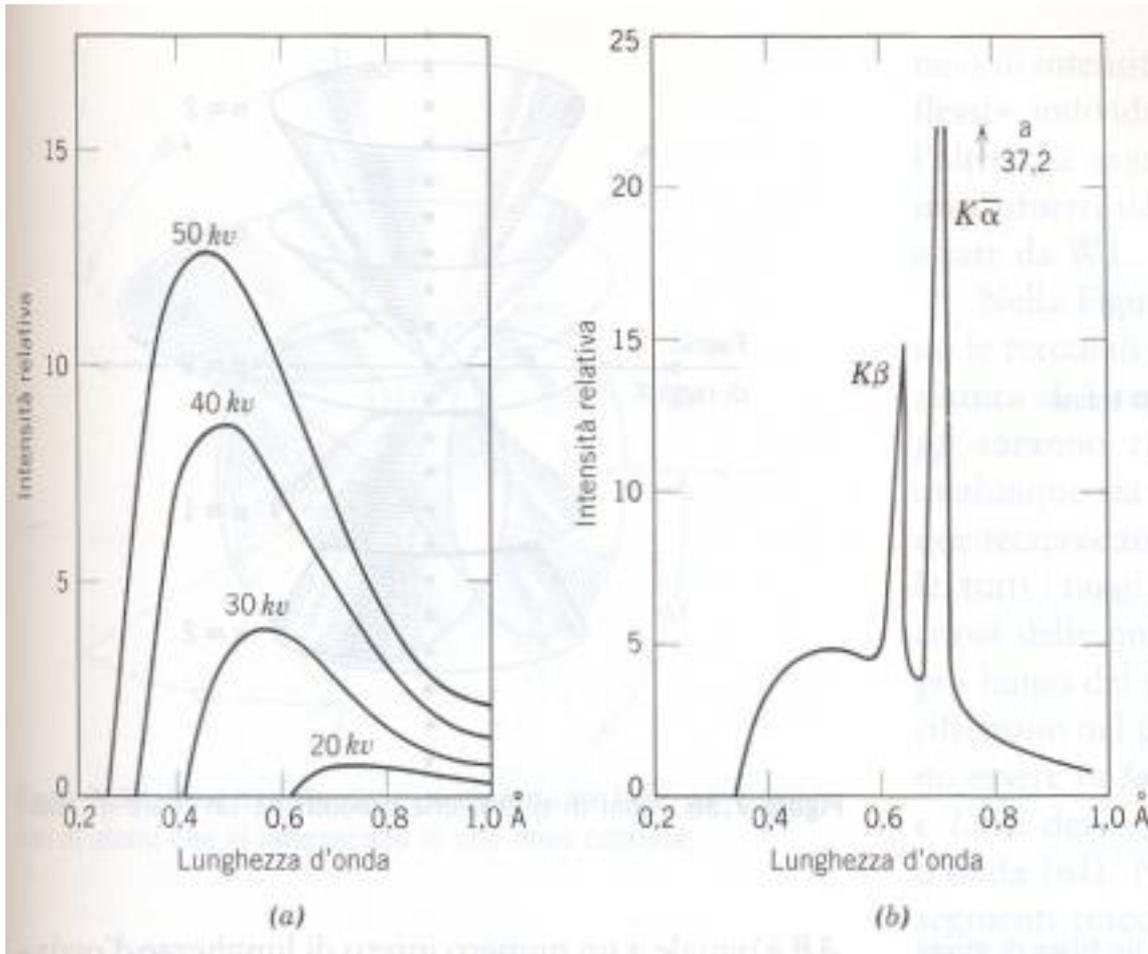
c = velocità della luce (c. 300.000 km/s)

λ = lunghezza d'onda

Tubo produzione RX



Spettro continuo e caratteristico



Il picco K_{α} corrisponde al salto quantico dal livello L a quello K, mentre K_{β} corrisponde al salto quantico dal livello M a K.

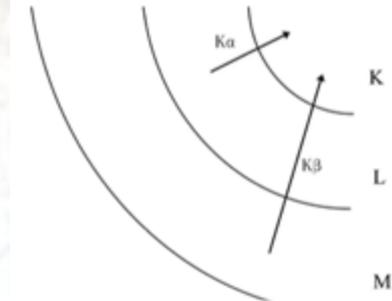


Figura 7.33 Esempi di spettri X. (a) Distribuzione delle intensità in funzione della lunghezza d'onda per lo spettro continuo del tungsteno a varie tensioni di accelerazione. (b) Spettro X del molibdeno con i picchi dello spettro caratteristico sovrapposti allo spettro continuo (da Ulrey, C.T., 1918, An experimental investigation of the energy in the continuous X-ray spectra of certain elements. *Phys. Reviews* 11: 401-410).

$$\lambda_{\min} = 12398/V_{\text{acc}}$$

Legge di Bragg

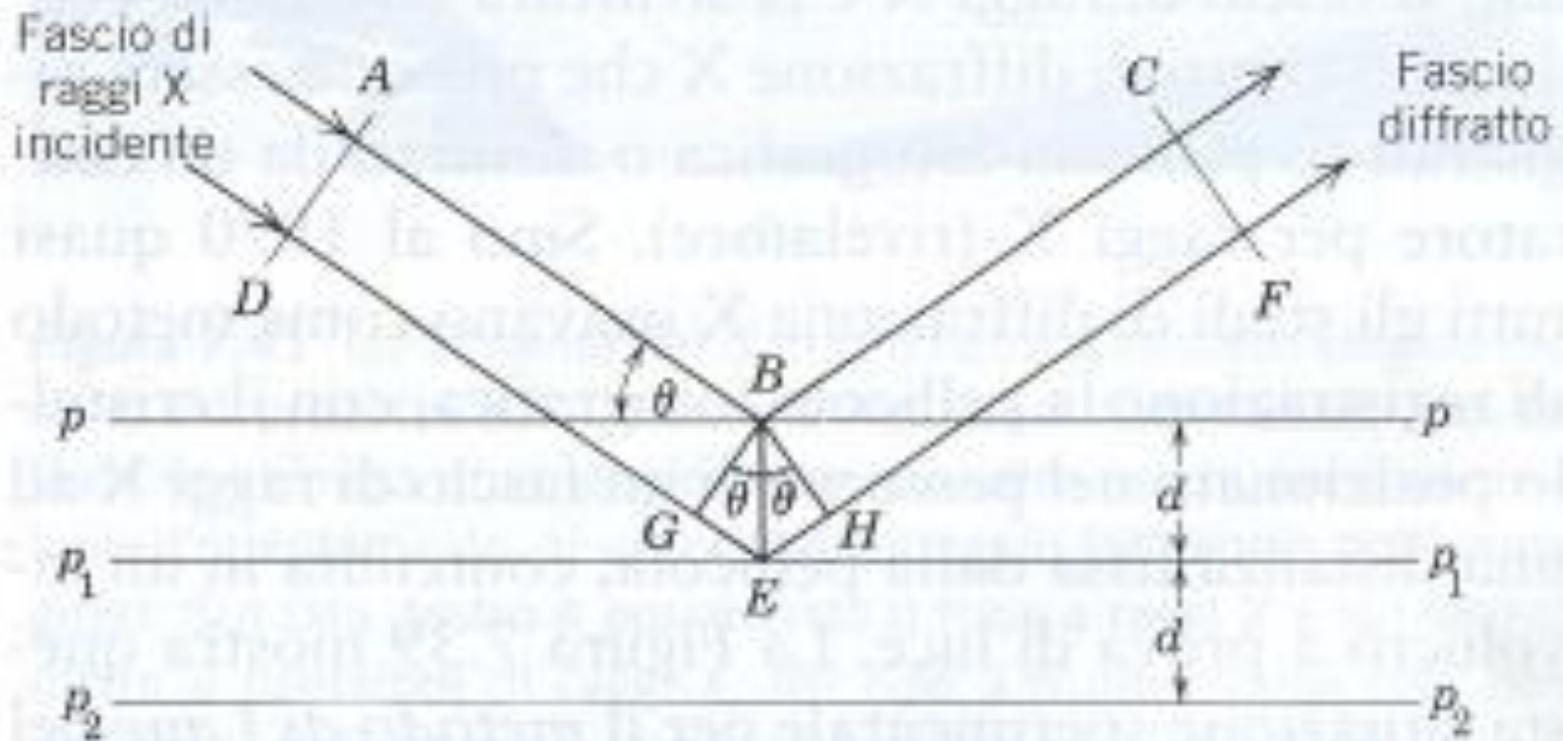
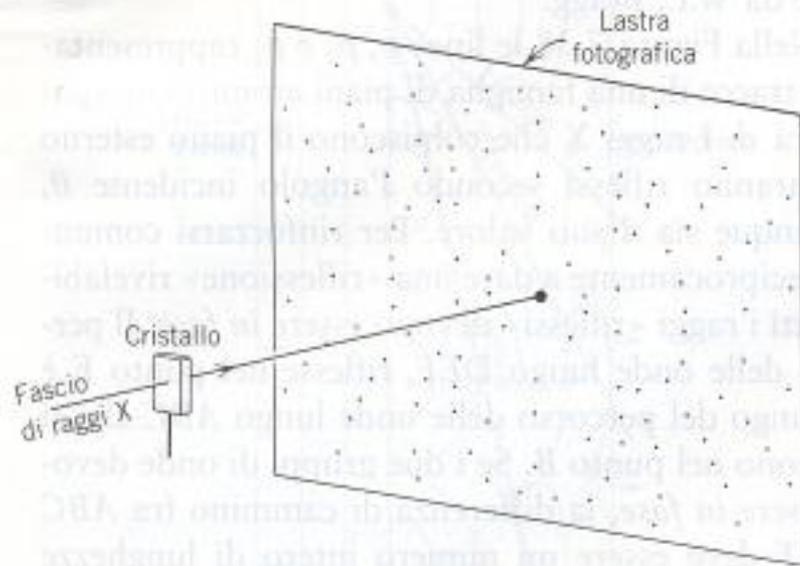


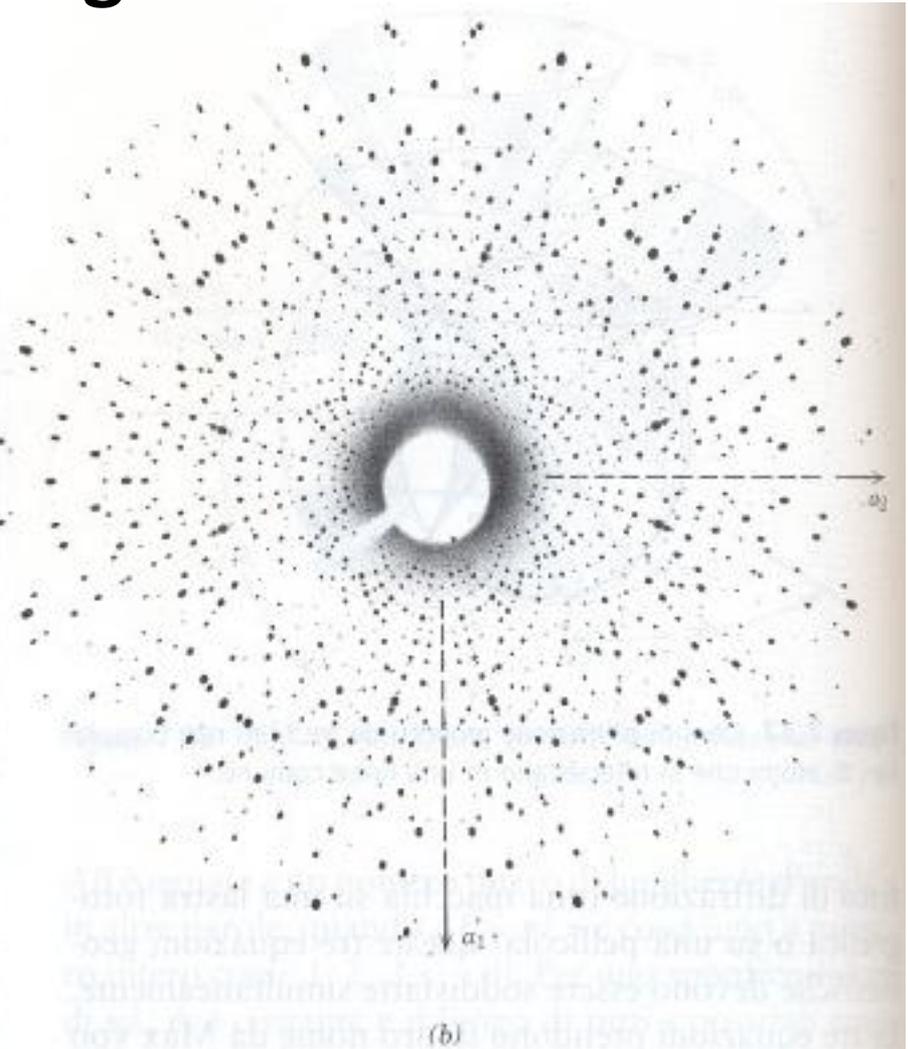
Figura 7.38 Geometria della «riflessione» dei raggi X.

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

Diffrazione da Cristallo Singolo

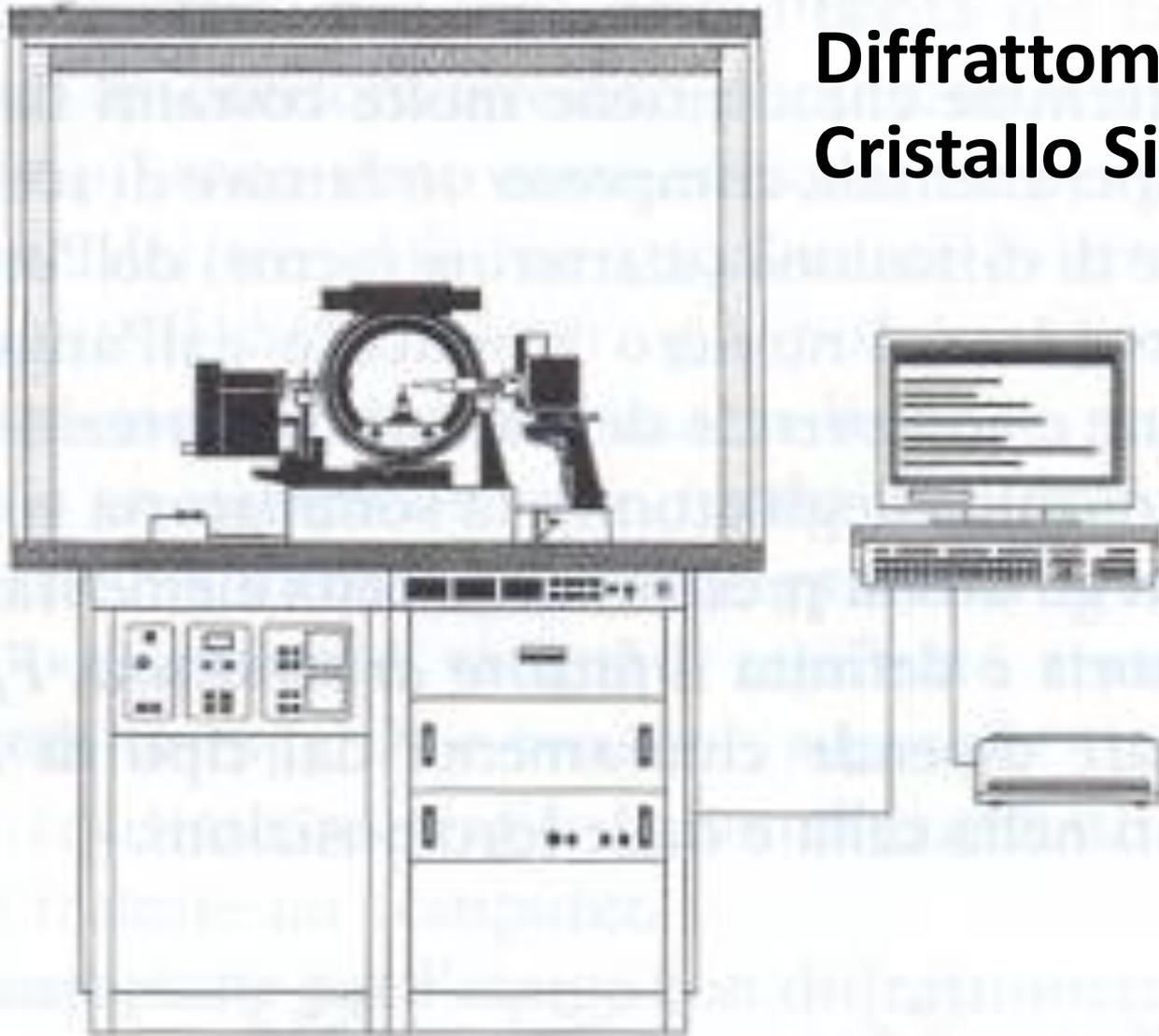


(a)

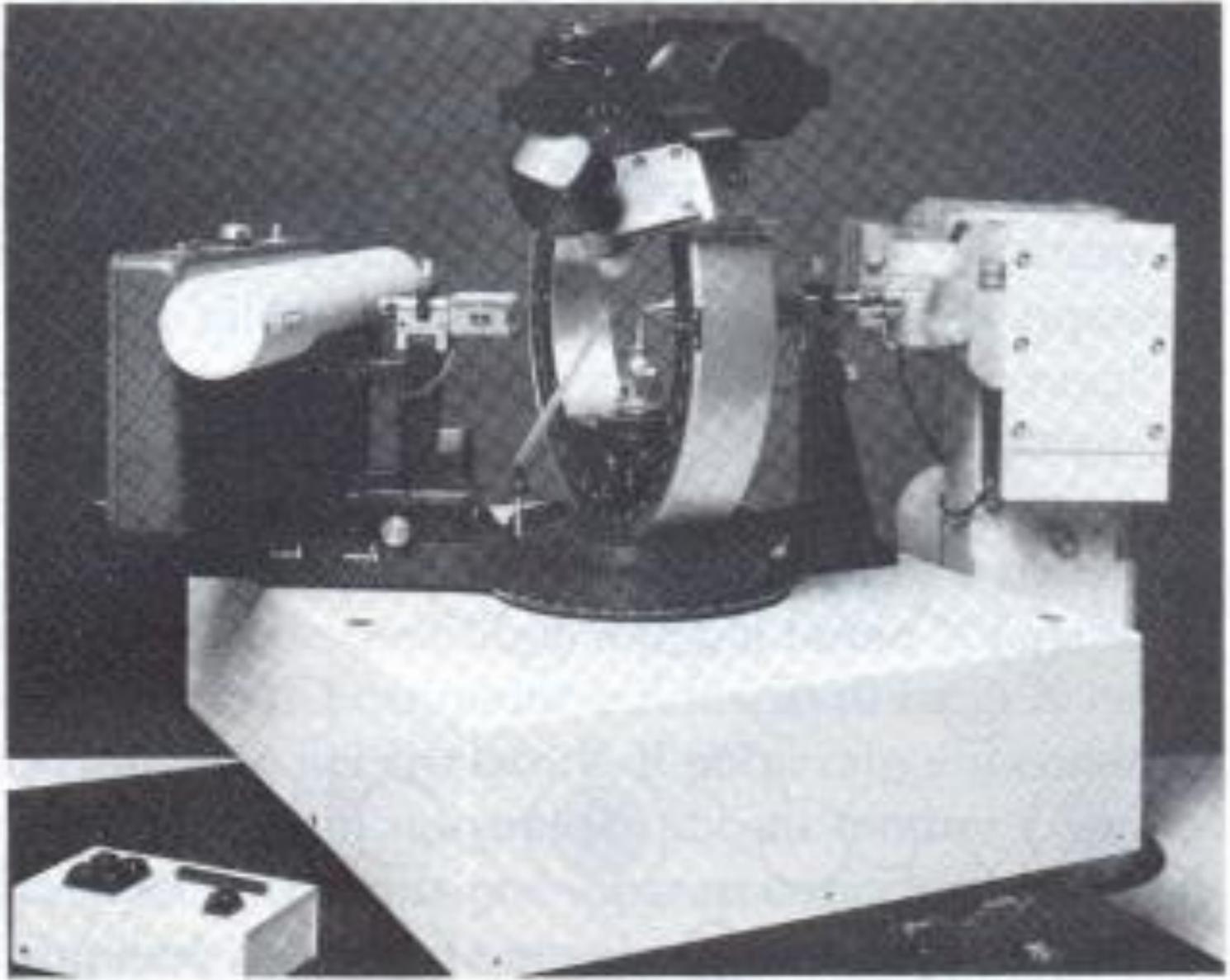


(b)

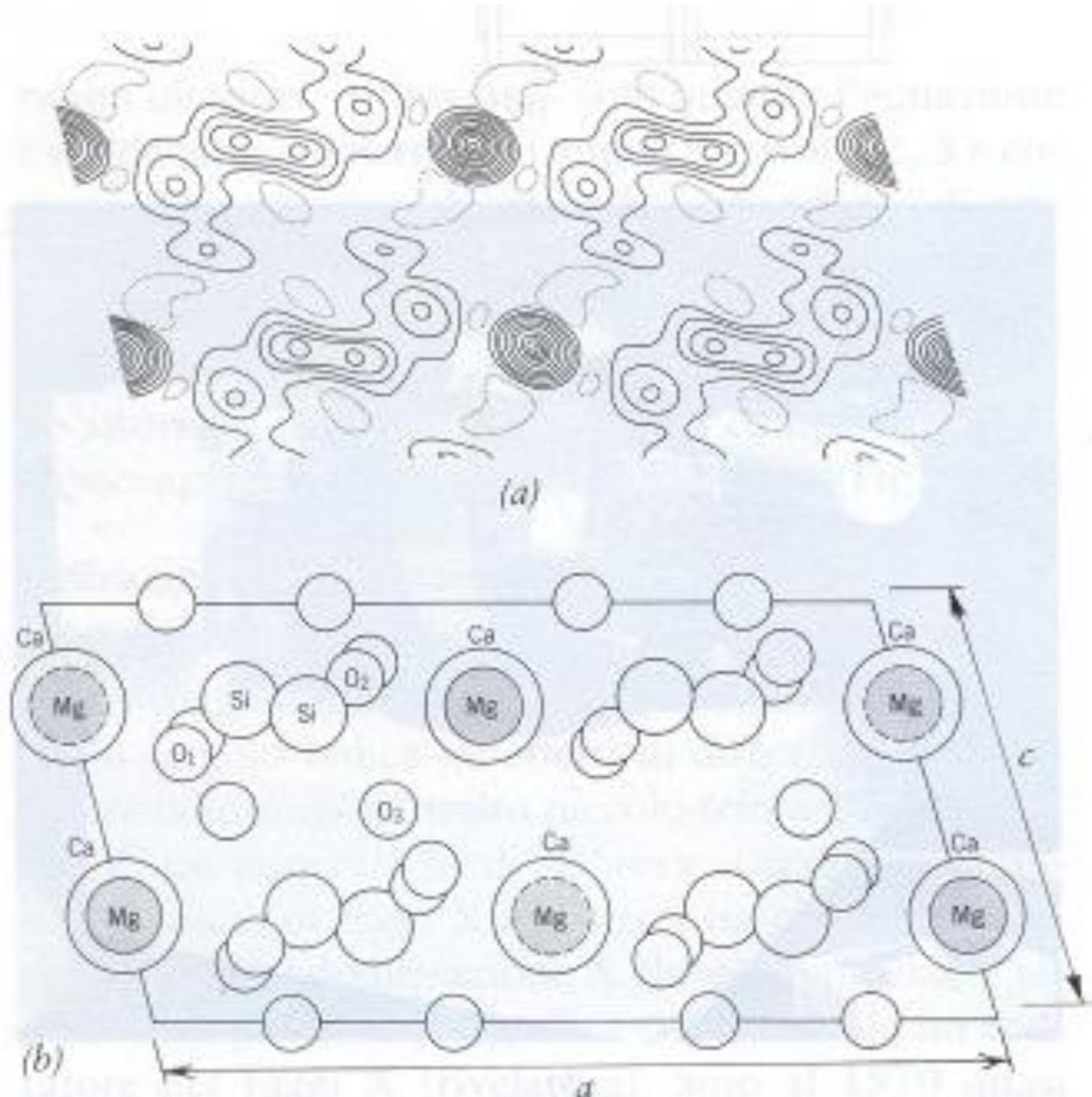
Diffratometro a Cristallo Singolo



(a)



(b)
Mineralogia



Diffrazione da Polveri

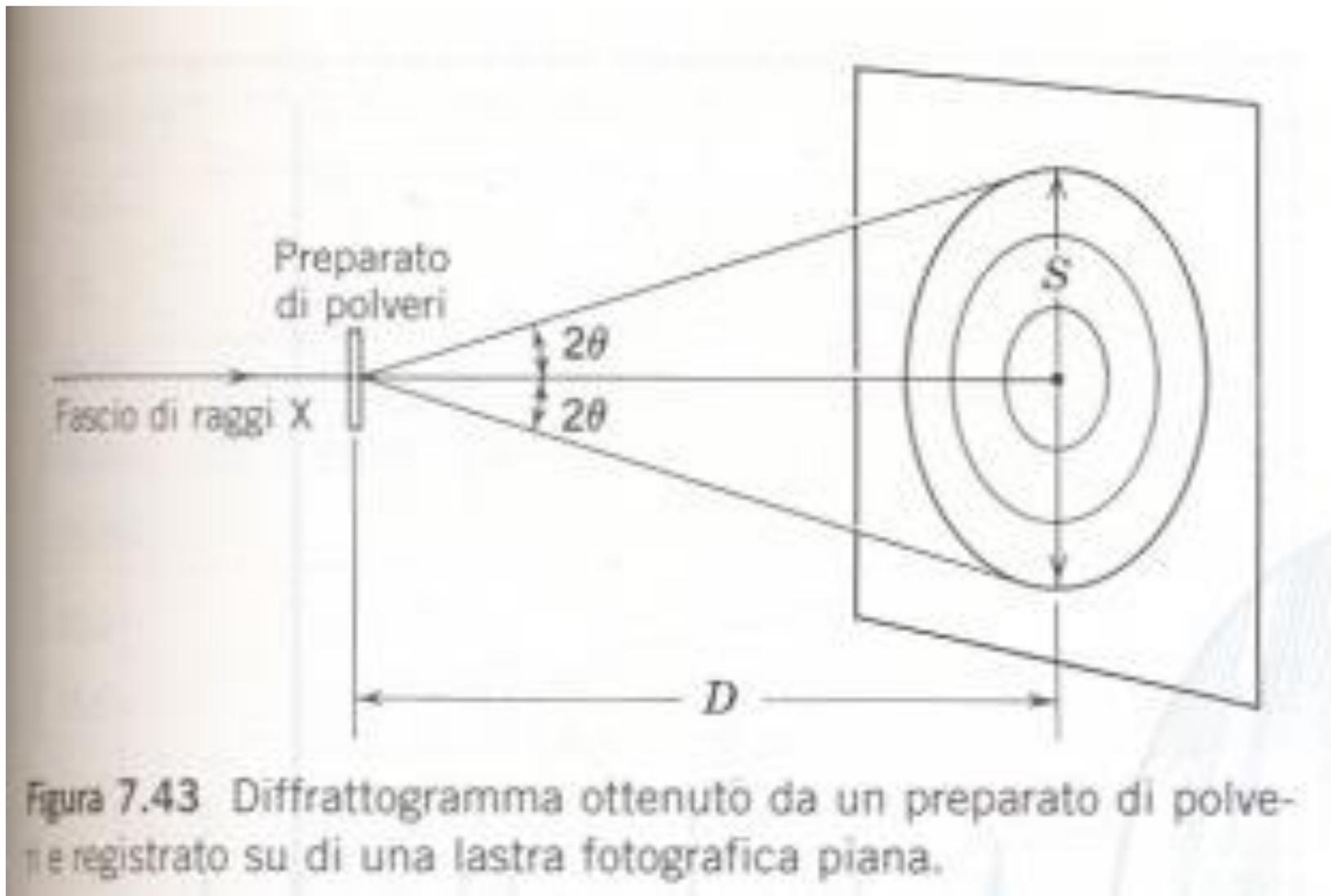


Figura 7.43 Diffrattogramma ottenuto da un preparato di polveri registrato su di una lastra fotografica piana.

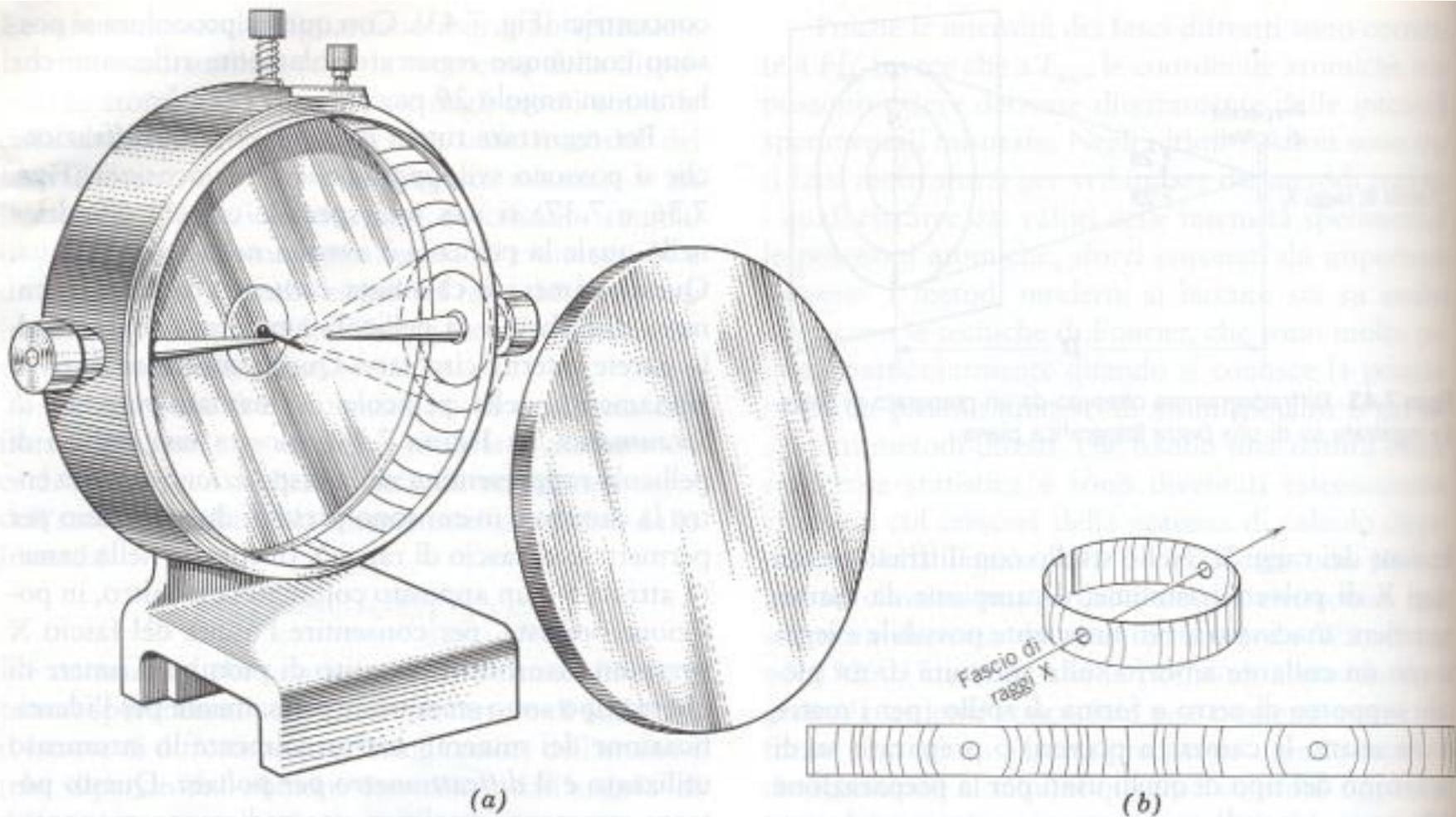
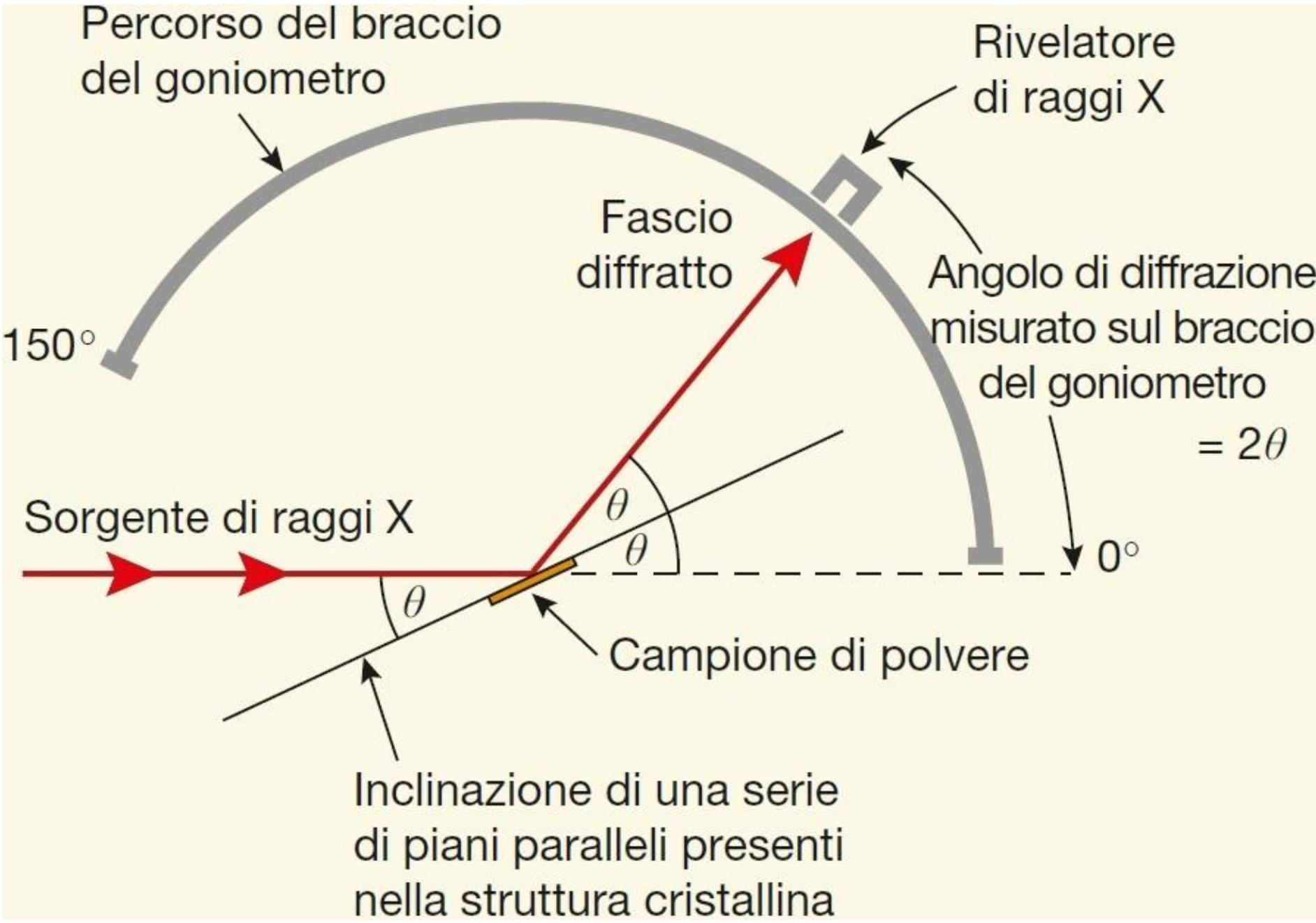
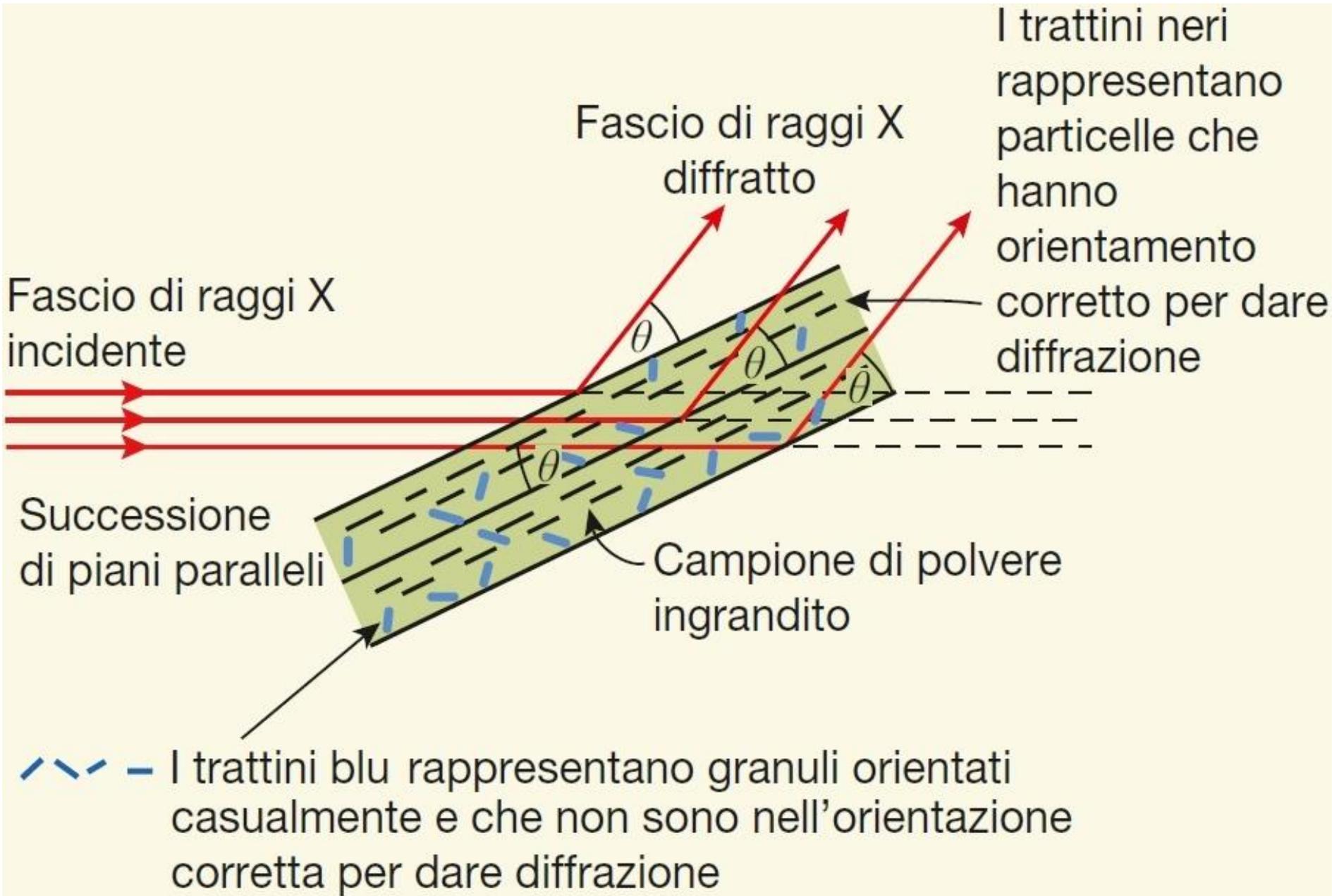
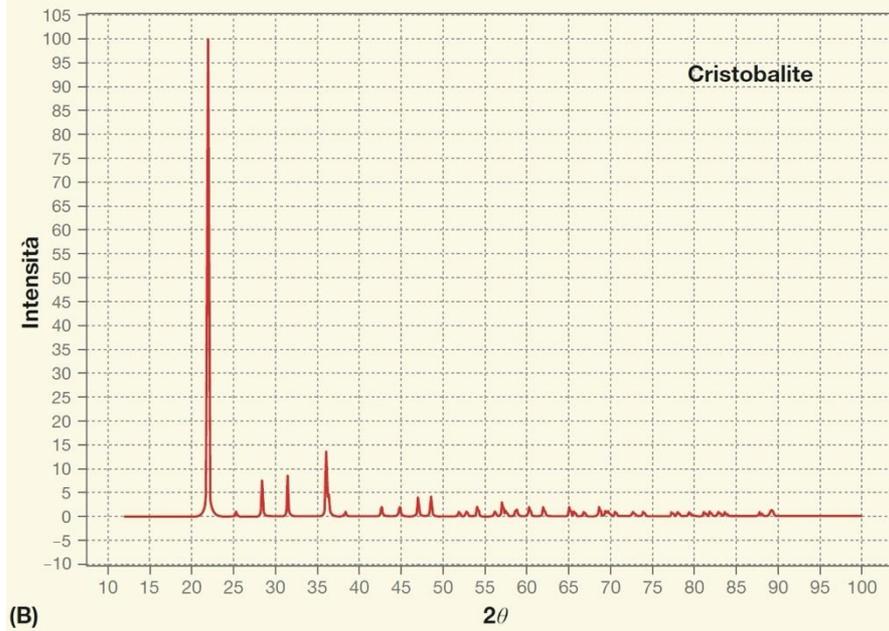
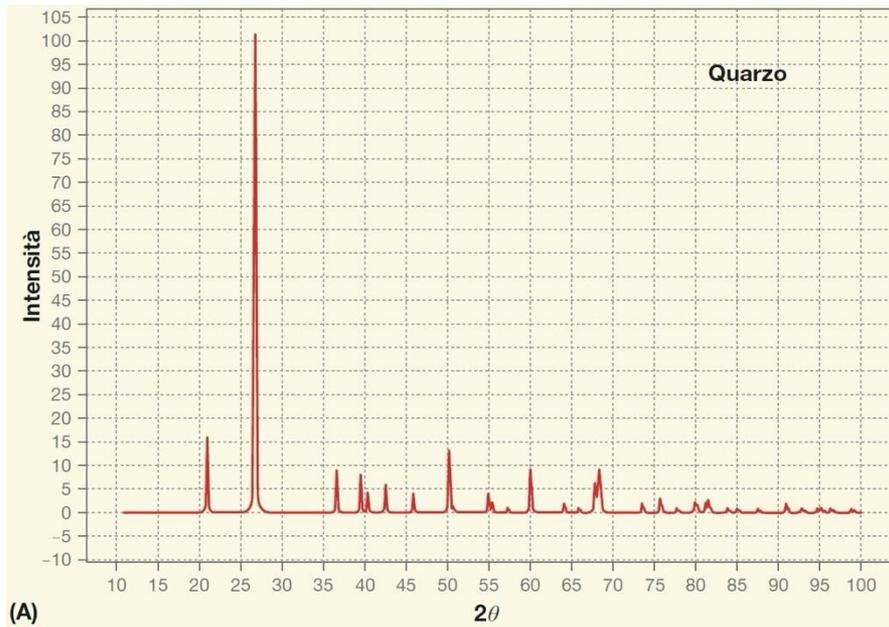


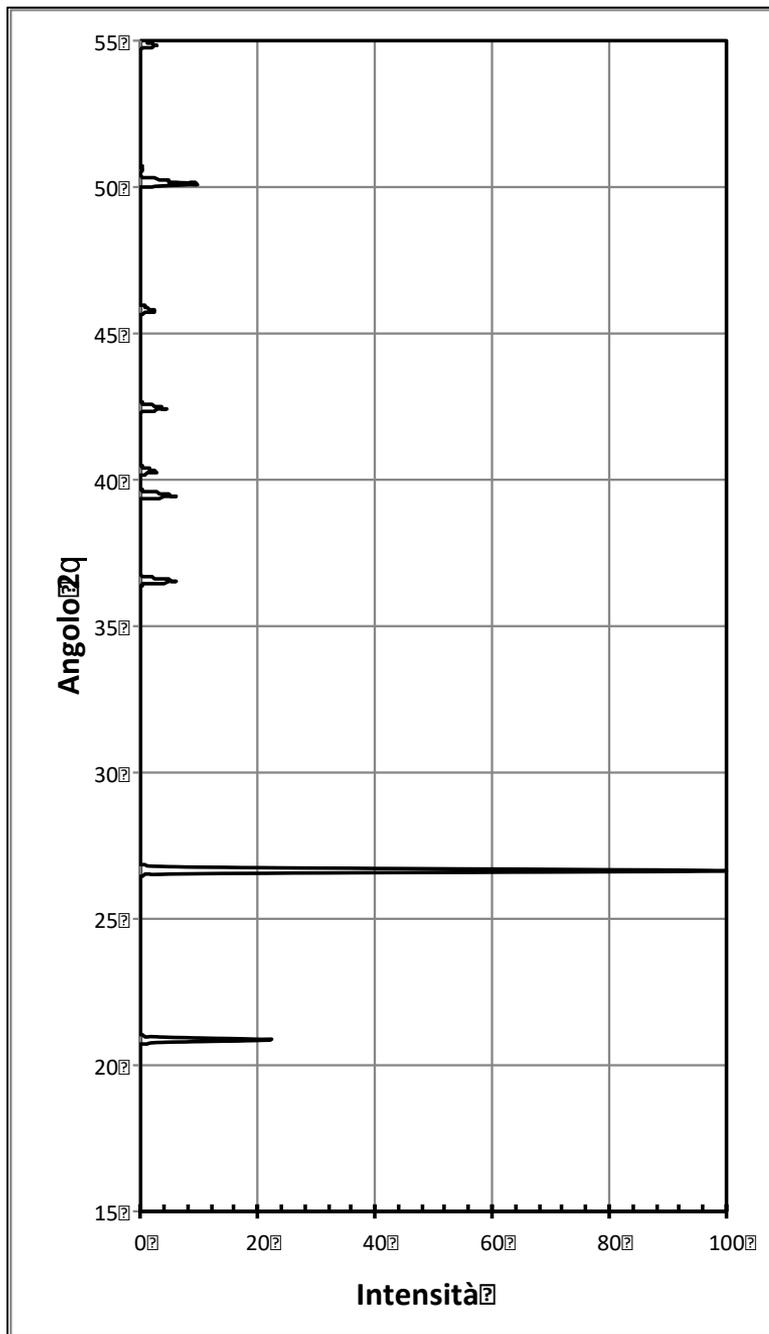
Figura 7.44 (a) Camera di diffrazione per polveri con un porta-campione a forma di spillo posto al centro e una pellicola fotografica avvolta nella parte cilindrica interna della camera. (b) La

striscia di pellicola fotografica con linee curve che rappresentano le «riflessioni» coniche prodotte all'interno della camera.









gia

2θ	$d \text{ \AA}$	I
50.15	1.817	15
45.60	1.980	5
42.50	2.128	8
39.50	2.280	10
36.60	2.460	10

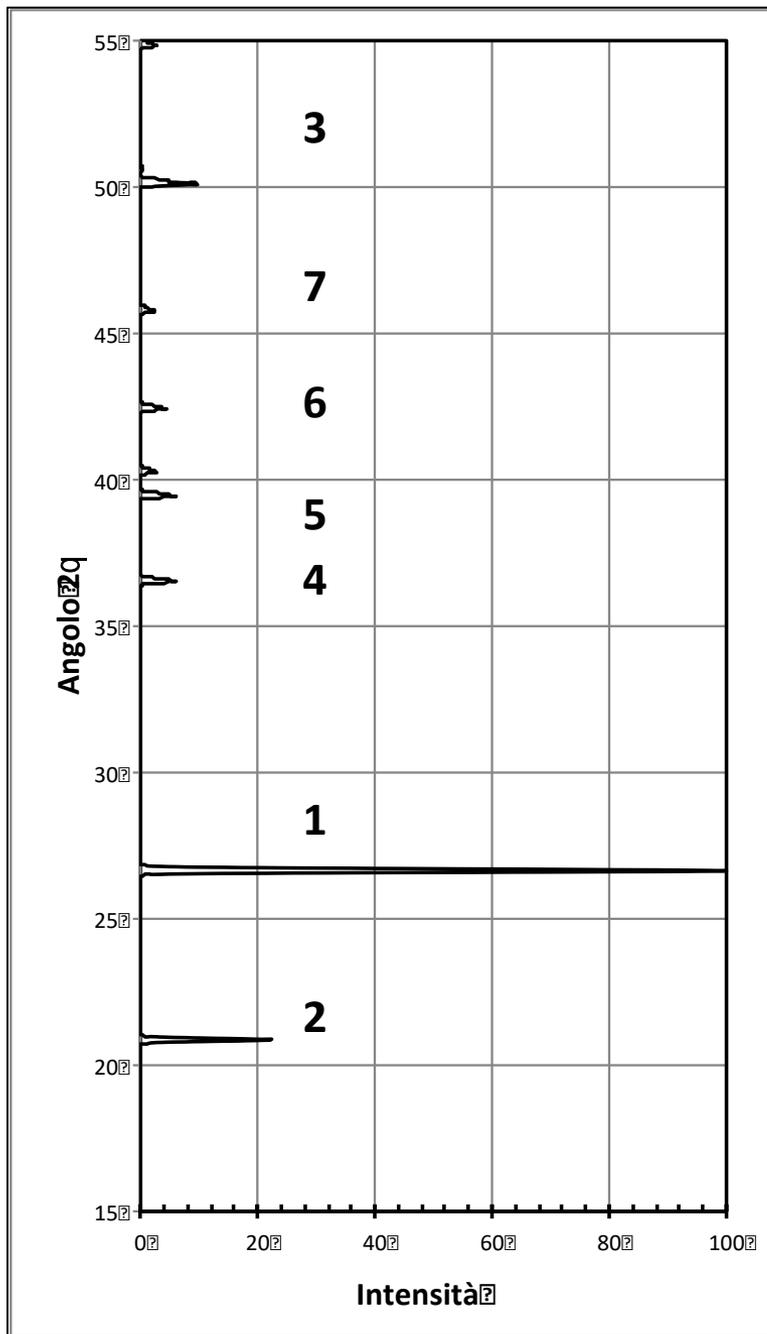
26.70 3.340 100

20.90 4.260 22

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

Per $n = 1$ e $\lambda = 1.54$

$$d = \lambda / (2\sin\theta)$$



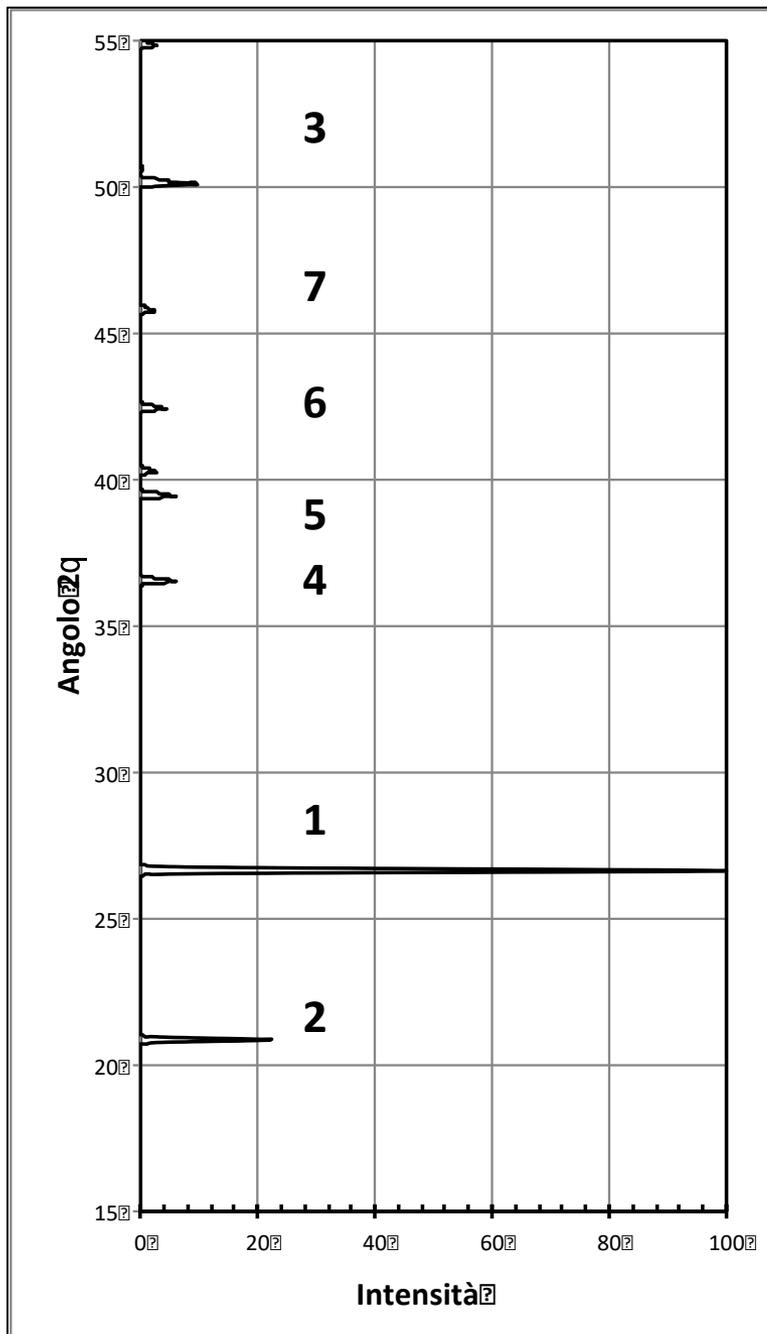
	2θ	$d \text{ \AA}$	I
1)	26.70	3.340	100
2)	20.90	4.260	22
3)	50.15	1.817	15
4)	39.50	2.280	10
5)	36.60	2.460	10
6)	42.50	2.128	8
7)	45.60	1.980	5

L'indice di **Hanawalt** è diviso in 87 sezioni: nella prima vi sono i minerali con $d_{(hkl)}$ di uno dei tre effetti di diffrazione più intensi compreso tra 999.99 e 10.00 Å, nella seconda tra 9.99 e 8.00 Å, nella terza tra 7.99 e 7.00 Å, ..., nella penultima tra 1.39 e 1.20 Å e nell'ultima tra 1.19 e 1.00 Å.

L'indice di Hanawalt viene consultato in base ai $d_{(hkl)}$ dei tre effetti di diffrazione più intensi (quelli in neretto). Uno dei tre $d_{(hkl)}$, generalmente quello più intenso, serve per identificare una delle 87 sezioni, col secondo si cerca di identificare una o più righe scorrendo la seconda colonna dell'indice, che è l'unica ordinata per $d_{(hkl)}$ decrescenti. Trovata così una o più righe, s'identifica il minerale aiutandosi con il primo ed il terzo effetto di diffrazione più intensi, confrontati con quelli presenti nella prima e terza colonna. La conferma finale si ha dal confronto con gli altri cinque effetti di diffrazione presenti, tenuto conto anche delle intensità relative dei vari effetti di diffrazione.

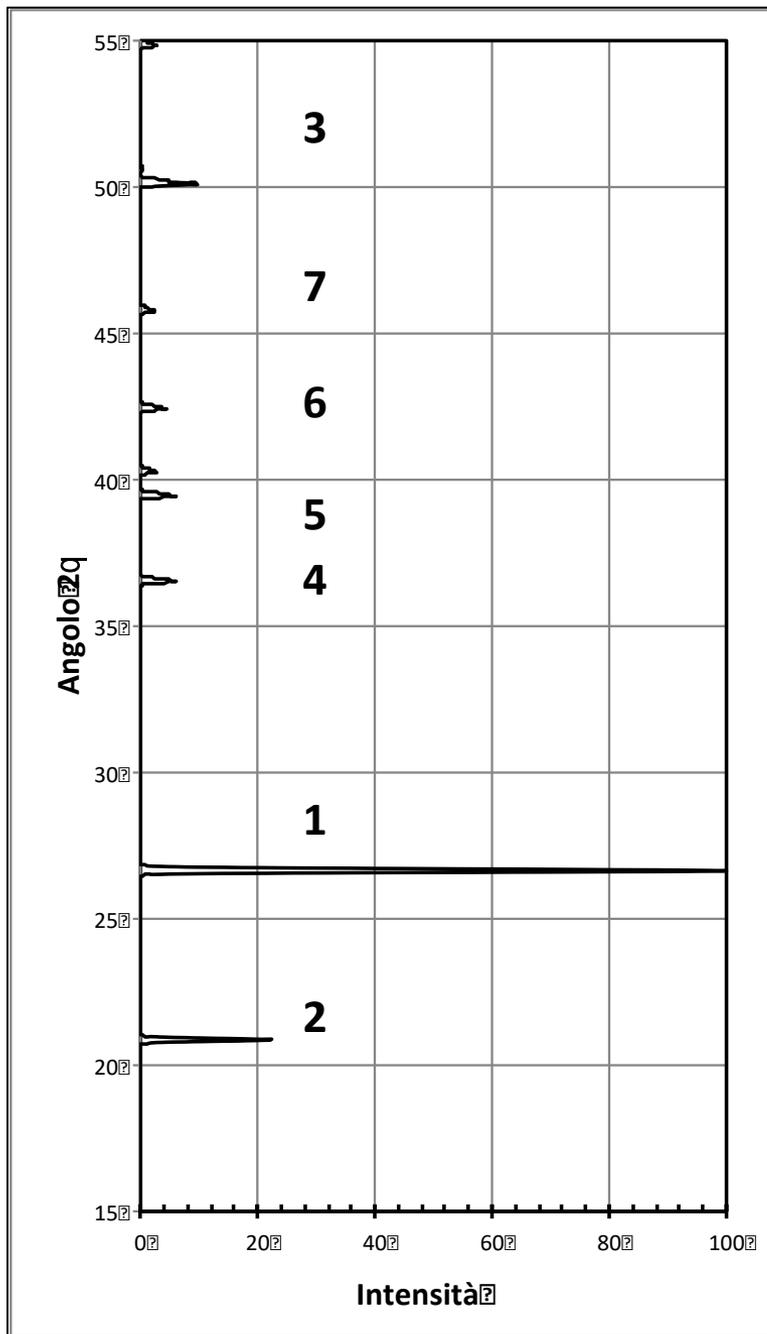
Per considerare l'errore nella determinazione dei $d_{(hkl)}$, ogni sezione ha un certo grado di sovrapposizione con la sezione precedente e seguente. Per considerare anche dell'errore relativo alla determinazione dell'intensità degli effetti di diffrazione (causata da diversità di tecniche, da orientazioni particolari, ecc.), per ogni minerale sono presenti tre combinazioni delle sei possibili e relative a d_1, d_2, d_3 e cioè: d_1-d_2 , d_2-d_3 , d_3-d_1 .

Individuato il minerale in esame si legge il relativo numero di scheda e si procede al confronto di tutti i $d_{(hkl)}$ misurati.



	2θ	d Å	I
1)	26.70	3.340	100
2)	20.90	4.260	22
3)	50.15	1.817	15
4)	39.50	2.280	10
5)	36.60	2.460	10
6)	42.50	2.128	8
7)	45.60	1.980	5

										File No.	
3.33	17.2x	5.53	2.62	2.44	3.19	2.37	2.26			(Mg,Fe)Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·2H ₂ O	21-1431
3.30	11.1x	5.56	5.64	4.59	3.71	4.31	5.02			Al ₂ F ₂ Zr ₂ F ₂ SO ₄ (OH) ₂ ·2H ₂ O	25-16
3.29	10.2x	5.09	2.71	2.65	2.44	2.17	1.57			Ca ₂ Ca ₂ Zn ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₂ ·2H ₂ O	22-148
3.27	10.2x	5.08	2.65	2.51	4.67	3.73	3.18			Ca ₂ Ca(SO ₄) ₂ (OH) ₂ ·2H ₂ O	22-231
3.28	16.2x	2.01	2.68	6.78	3.58	5.86	1.73			Na ₂ Fe(SO ₄) ₂ (OH)·2H ₂ O	17-156
3.22x	10.1	3.35	3.09	3.64	2.59	1.99	2.90			K ₂ (Mn ₂ Si ₂ Al ₂ O ₇) ₂	29-822
3.41	10.0	3.02x	5.21	4.97	2.93	2.55	2.28			Ca(UO ₂) ₂ AsO ₄ ·10H ₂ O	29-290
3.25	10.0x	4.54	2.60	1.52	3.06	3.11	2.42			KAl ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	10-496
3.35	10.0x	4.36	2.54	1.48	1.48	1.67	1.28			Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·2H ₂ O	29-1899
3.35	10.0x	3.53x	5.09	1.60	2.25	1.78	2.50			Ba(UO ₂) ₂ AsO ₄ ·10H ₂ O	29-210
3.34x	10.0	5.02	2.01	2.97	4.48	3.20	4.44			(K,H,OH)Al ₂ Si ₂ AlO ₇ (OH) ₂	26-911
3.24x	10.0	4.99	3.63	3.08	2.58	1.99	2.60			K(Al ₂ Si ₂ AlO ₇) ₂ (OH) ₂	10-485
3.37	10.0x	4.88	2.61	1.32	2.42	1.67	4.97			Si ₂ Al ₂ Si ₂ AlO ₇ (OH) ₂	9-343
3.36	9.99x	2.62x	3.27	1.34	2.43	1.67	2.16			K(Al ₂ Si ₂ AlO ₇) ₂ (OH) ₂	25-1355
3.22x	9.96	2.00	2.62	1.67	2.43	2.17	1.52			K(Mg ₂ Si ₂ AlO ₇) ₂	16-322
3.22x	9.95	4.08	2.40	3.11	2.00	4.51	4.48			K ₂ (Mg ₂ Si ₂ AlO ₇) ₂	15-237
3.22x	9.95x	2.57	1.97	2.99	4.97	3.18	1.50			KAl ₂ (Si ₂ AlO ₇) ₂ (OH) ₂	6-263
3.41	9.56x	3.51	3.78	3.18	2.71	2.18	3.37			(Ca ₂ Si)(OH) ₂ ·12H ₂ O(SO ₄) ₂	25-128
3.34	9.10x	3.82	3.59	5.64	2.79	5.08	4.53			K(UO ₂) ₂ AsO ₄ ·2H ₂ O	18-386
3.27	8.88x	7.62	5.47	4.81	8.55	4.73	2.78			Fe ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	27-254
3.34	8.85x	3.59	3.10	5.57	3.74	2.55	1.80			Mata-uranospinite, 9A syn	8-319
3.31	8.85	3.66x	2.58	1.84	3.67	1.66	4.47			Ca(UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ ·2H ₂ O	8-319
3.33	8.81x	2.94	3.16	2.86	10.9	4.74	4.47			Na ₂ Mg(PO ₃) ₂ (CO ₃) ₂	22-476
3.23x	8.65	17.4x	7.85	12.2	7.44	2.37	4.25			(Fe,Mn)As ₂ O ₇	29-774
3.31	8.65x	3.57x	3.53	3.00	3.08	4.36	3.67			(Al,Fe) ₂ (OH) ₂ (AsO ₄) ₂ ·2H ₂ O	11-146
3.29x	8.63	8.55	4.09	3.38	3.07	3.06	3.14			Ca(UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	18-309
3.30	8.59x	3.78	5.50	4.35	2.70	2.19	2.01			Fe ₂ Al ₂ Si ₂ O ₇	17-525
3.25	8.42x	5.05x	16.8	2.78	2.09	3.17	1.86			(H ₂ O) ₂ (UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ ·6H ₂ O	8-326
3.31	8.37	3.96	4.01	4.38	2.58	1.76	9.15			UO ₂ (AsO ₄) ₂ ·4H ₂ O	13-778
3.41	7.73x	4.18	3.87	3.12	3.04	4.38	5.52			Br ₂ Si ₂ Al ₂ Si ₂ O ₇	20-165
										Ca(UO ₂) ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₂ ·6H ₂ O	17-530
3.32	7.40x	3.29	2.71	8.30	6.77	6.00	3.07			Fe ₂ (MnO ₂) ₂ ·nH ₂ O	15-290
3.35x	7.27x	3.76x	3.03x	3.56	2.80	6.47	2.01			Na ₂ Ca ₂ Fe ₂ Si ₂ O ₇ ·2H ₂ O	27-672
3.31	6.94x	4.85	2.60	3.47	3.06	2.30	2.97			Ca ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	7-326
3.38	6.90x	11.4	3.07	2.98	2.59	1.74	1.76			Ca ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	7-326
3.32x	6.52	3.47x	2.50	3.02	3.55	4.61	2.77			Na ₂ Ti ₂ (Si ₂ O ₇) ₂ ·2H ₂ O	25-1218
3.34	6.19	12.4x	4.12	3.07	2.79	2.46	2.93			(Ba,K)AlSi ₂ O ₇	21-812
3.30	5.97x	2.89	3.23	3.18	3.13	2.49	2.48			Ca ₂ Al ₂ Si ₂ O ₇ ·2H ₂ O	11-312
3.40	5.88x	3.39	3.49	4.37	4.23	2.01	3.53			GMH ₂ O ₄ ·SH ₂ O	24-1259
3.34	5.77	3.17x	1.97	1.84	2.69	1.72	1.84			UO ₂ ·4H ₂ O	16-206
3.32	5.77x	6.68	1.91	4.45	11.4	4.95	2.44			(Ba,K)AlSi ₂ O ₇	11-317
3.34x	5.74	1.87x	3.25	2.12	3.57	1.75	7.13			Ca ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	16-146
3.41x	5.57	3.90	2.49	6.81	4.83	2.68	1.73			Fe-TeO	16-146
3.39x	5.57	3.42	2.91	6.82	4.84	2.68	2.49			Ca(Al ₂ Si ₂ O ₇) ₂ ·2H ₂ O	11-156
3.40	5.53x	3.35	3.07	6.75	2.68	2.61	2.12			CaAl ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	7-326
3.35	5.39x	4.94	3.77	3.04	2.57	2.88	2.18			KAl ₂ (PO ₃) ₂ (OH) ₂ ·4H ₂ O	27-271
3.32	5.30	3.38x	2.64	2.00	1.82	2.16	3.37			Ca ₂ SO ₄ ·2H ₂ O	17-523
3.37	5.23	3.23x	2.75	2.00	2.32	2.55	1.95			KH ₂ Ca ₂ (H ₂ O) ₂	25-677
3.39	5.18	6.79x	2.57	3.12	3.31	4.68	3.94			Na ₂ Cr ₂ O ₇ ·6H ₂ O	26-1275
3.40	5.09	10.2x	2.55	1.70	2.65	2.46	2.03			Ca ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	13-243
3.38x	5.08	2.54	2.60	1.47	3.67	2.94	2.82			K ₂ ZnMnF ₂ (Si ₂ AlO ₇) ₂ (OH) ₂	19-544
3.32x	5.00	2.49	9.22	2.72	2.68	3.43	1.97			BaMn ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₂	29-185
3.33x	4.99	9.97x	2.00	2.56	4.05	4.46	2.88			Amundite, 2M	19-78
3.30	4.96	9.83x	5.83	3.00	2.89	3.50	4.08			Kakite	7-42
3.30x	4.87	4.36	3.16	3.10	2.92	2.85	2.18			KAl ₂ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	11-475
3.41x	4.84	3.32	2.53	2.06	3.05	2.57	1.62			Pb ₂ (MnCO ₃) ₂ (SO ₄) ₂	24-627
3.32	4.84	3.72x	2.14	2.69	2.47	1.80	2.79			MgSO ₄ ·H ₂ O	13-102
3.31	4.84	3.36x	3.24	3.16	2.33	1.31	2.41			(CaNa) ₂ (Si ₂ Al) ₂ O ₇ (SO ₄) ₂ ·2H ₂ O	29-1187
3.20x	4.82	3.69x	4.00	2.89	2.13	6.00	2.46			Fe ₂ (PO ₃) ₂ (OH) ₂	11-423
3.35g	4.74x	3.64g	6.04	3.02	2.90	2.04	2.77			Na ₂ Ca ₂ Si ₂ Al ₂ O ₇ (SO ₄) ₂	20-1088
3.31x	4.73	2.89	2.31	1.90	4.09	2.90	2.77			U ₂ O ₇	12-477
3.38	4.70	3.15x	12.4	4.52	2.48	4.14	2.59			Pb ₂ CaCr ₂ (PO ₃) ₂ (OH) ₂	13-302
3.36x	4.66	4.43x	2.81	2.42	2.29	4.13	2.30			Leelite	27-1
3.36x	4.49	10.1x	2.57	3.66	3.07	2.58	3.04			Si ₂ (OH) ₂	17-545
3.32x	4.48	6.14x	2.89	2.47	1.86	2.09	1.98			KAl ₂ Si ₂ AlO ₇ (OH) ₂	7-25
3.38	4.46x	8.86	2.83	3.82	2.22	1.48	4.55			(UO ₂) ₂ (SiO ₃) ₂ (OH) ₂ ·2H ₂ O	12-180
										Zn ₂ Fe(PO ₃) ₂ ·4H ₂ O	20-1427
3.30x	4.43	2.57	1.71	2.07	1.97	1.65	1.75			ZnSiO ₃	6-266
3.34	4.42x	10.1	1.48	2.56	1.68	1.28	1.33			Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·2H ₂ O	9-451
3.37x	4.41	3.22	3.09	2.45	2.39	8.02	2.75			Fe ₂ SO ₄	3-492
3.32	4.38	6.92x	4.22	3.48	4.87	2.32	3.20			(Y,Ca) ₂ (CO ₃) ₂ Si ₂ O ₇ ·4H ₂ O	26-1394
3.38	4.31x	2.64x	2.58	2.72	1.51	2.42	1.97			VO(OH)	11-152
3.37x	4.28	1.84	1.55	2.47	2.31	1.25	1.39			Beilite syn	10-423
3.34x	4.27	3.19	2.70	7.28	4.71	1.82	3.13			Gismondine	10-423
3.34x	4.26	2.12	7.40	2.57	2.03	3.47	2.74			Despoinite	20-452
3.34x	4.26	2.13	7.40	3.49	2.58	2.74	2.21			Co ₂ Mn(SiO ₃) ₂ (OH) ₂ ·2H ₂ O	20-228
3.34x	4.26	1.82	1.54	2.40	2.40	2.28	1.38			Schausite	19-225
										α-SiO ₂	5-490
3.39	4.25	2.81x	3.97	3.12	2.59	1.72	6.51			Si ²⁺ Anatite syn	12-186
3.31	4.24x	2.62	2.17	2.85	2.97	1.87	1.75			Na ₂ MgCl ₂ (SO ₄) ₂	12-186
3.30x	4.23	1.64	2.72	2.44	2.22	1.93	2.14			Fe ₂ (SiO ₃) ₂	20-538
3.31	4.23	6.95x	3.02	2.88	2.15	1.96	1.89			MnO ₂ ·nH ₂ O	21-574
3.37	4.22x	8.45	2.89	3.31	2.81	2.73	2.28			Spessite	15-378
										Na ₂ Bo ₂ Ti ₂ Si ₂ O ₁₀	25-784



	2θ	d Å	I
1)	26.70	3.340	100
2)	20.90	4.260	22
3)	50.15	1.817	15
4)	39.50	2.280	10
5)	36.60	2.460	10
6)	42.50	2.128	8
7)	45.60	1.980	5

*	3.30x	4.43 ₁	2.52 ₁	1.71 ₄	2.07 ₂	1.91 ₁	1.65 ₁	1.75 ₁	Zircon	ZrSiO ₄	6- 266
	3.34 ₁	4.42x	10.1 ₁	1.48 ₈	2.56 ₈	1.68 ₈	1.28 ₁	1.23 ₁	Halloysite, 10A	Al ₇ Si ₂ O ₅ (OH) ₂ ·2H ₂ O	9- 451
i	3.39x	4.41 ₇	3.22 ₇	3.09 ₃	2.65 ₃	2.39 ₃	8.02 ₄	2.75 ₄	Gillespite	BaFeSi ₄ O ₁₀	3- 402
i	3.32 ₁	4.38 ₈	6.93x	4.22 ₄	3.48 ₈	4.87 ₄	2.32 ₄	3.20 ₃	Caysichite	(Y,Ca) ₄ (CO ₃) ₂ Si ₄ O ₁₀ ·4H ₂ O	26-1394
i	3.38 ₈	4.31x	2.64x	2.50 ₈	2.22 ₈	1.51 ₈	2.42 ₈	1.97 ₈	Montroseite	VO(OH)	11- 152
*	3.37x	4.28 ₁	1.84 ₁	1.55 ₁	2.47 ₁	2.31 ₁	1.39 ₁	1.39 ₁	Berlinite syn	AlPO ₄	10- 423
*	3.34x	4.27 ₄	3.19 ₂	2.70 ₂	7.28 ₂	4.91 ₂	1.82 ₂	3.13 ₁	Gismondine	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ·4H ₂ O	20- 452
i	3.34x	4.26 ₈	2.13 ₈	7.40 ₄	2.57 ₄	2.03 ₈	3.49 ₄	2.24 ₄	Daspujolsite	Ca ₂ Mn(SO ₄) ₂ (OH) ₈ ·3H ₂ O	20- 226
i	3.34x	4.26 ₇	2.13 ₈	7.40 ₃	3.49 ₃	2.58 ₃	2.24 ₁	2.21 ₁	Schaurteite	Ca ₂ Ge(SO ₄) ₂ (OH) ₄ ·4H ₂ O	19- 225
*	3.34x	4.26 ₄	1.82 ₂	1.54 ₂	2.46 ₁	2.28 ₁	1.38 ₁	2.13 ₁	Quartz, low	α-SiO ₂	5- 490
i	3.39 ₁	4.25 ₇	2.81x	3.97 ₇	3.12 ₇	2.59 ₇	1.72 ₁	6.51 ₃	D'Ansite syn	Na ₂ MgCl ₂ (SO ₄) ₁₀	12- 196
i	3.31 ₈	4.24x	2.62 ₈	2.17 ₈	2.85 ₃	2.97 ₄	1.87 ₃	1.75 ₃	Rodalquilarite	Fe ₂ H ₂ (TeO ₃) ₄ Cl	20- 536
o	3.36x	4.23 ₁	1.64 ₁	2.72 ₄	2.44 ₂	2.22 ₃	1.93 ₂	3.14 ₂	Ilsemannite	Mo ₂ O ₈ ·xH ₂ O	21- 574
i	3.31 ₈	4.23 ₈	6.95x	3.02 ₈	2.88 ₃	2.15 ₃	1.96 ₃	1.89 ₃	Boarsite	Be ₂ AsO ₄ (OH)·4H ₂ O	15- 378
i	3.37 ₇	4.22x	8.45 ₁	2.89 ₈	3.31 ₃	2.81 ₄	2.73 ₄	2.28 ₄	Leucosphenite	Na ₄ BaB ₇ Ti ₂ Si ₁₀ O ₃₀	25- 784

5-0490

d	3.34	4.26	1.82	4.26	α -SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz, low			
1/1 ₁	100	35	17	35						
Rad. CuK α , λ 1.5405 Filter Ni Dia.					d A	1/1 ₁	hkl	d A	1/1 ₁	hkl
Cutoff 1/1 ₁ Diffractometer 1/1 cor. \approx 3.6					4.26	35	100	1.728	2	220
Ref. Swanson and Fuyat, NBS Circular 539, Vol. 3, 24 (1954)					3.343	100	101	1.1907	5	213
Sys. Hexagonal S.G. P3 ₁ ,221 (152,154)					2.458	12	110	1.1973	2	221
					2.282	12	102	1.1838	4	114
a ₀ 4.913 b ₀ c ₀ 5.405 A C 1.10					2.237	6	111	1.1802	4	310
a β γ Z 3 D \times 2.647					2.128	9	200	1.1530	2	311
Ref. Ibid.					1.980	6	201	1.1408	<1	204
c ₀ a ₀ β 1.544 c ₀ 1.553 Sign +					1.817	17	112	1.1144	<1	303
					1.801	<1	003	1.0816	4	312
2V D 2.6556 mp Color Colorless					1.672	7	202	1.0636	1	400
Ref. Ibid.					1.659	3	103	1.0477	2	105
Sample from Lake Toxaway, N.C. Spect. anal.: \approx 0.01% Al; \approx 0.001% Ca, Cu, Fe, Hg.					1.608	<1	210	1.0437	2	401
					1.541	15	211	1.0346	2	214
Low quartz is form stable at room temperature.					1.453	3	113	1.0149	2	223
There are many other polymorphs.					1.418	<1	300	0.9896	2	402, 115
Merck Index, 8th Ed. p. 946.					1.382	7	212	.9872	2	313
X-ray pattern at 25°C.					1.375	11	203	.9781	<1	304
					1.372	9	301	.9762	1	320
					1.288	3	104	.9607	2	321
					1.256	4	302	Plus 25 reflections		

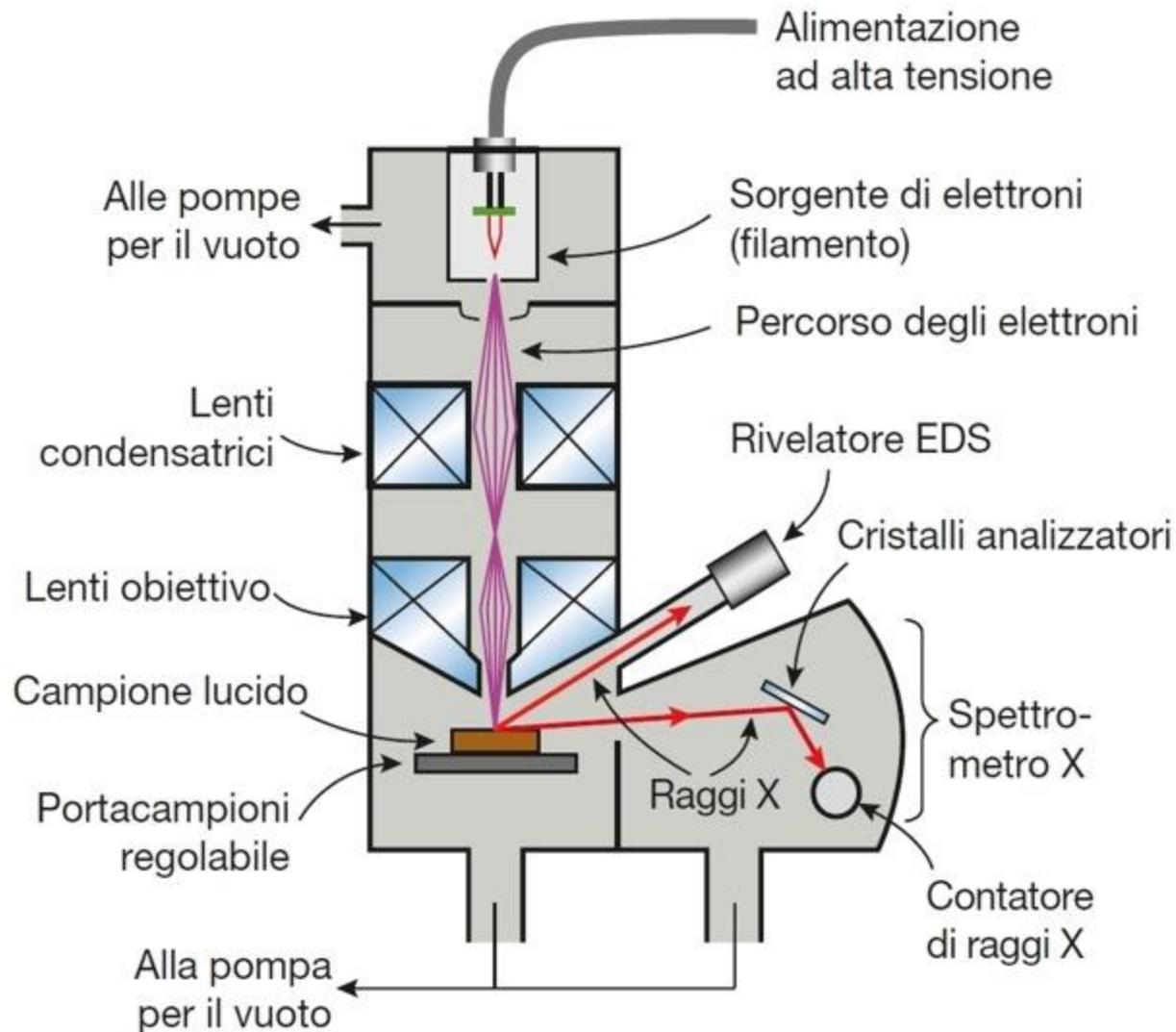


Figura 3.21 Schema di microsonda elettronica (EMPA). Si osserva la colonna elettrone-ottica e due possibili rivelatori per l'analisi dei raggi X (spettrometro per raggi X e rivelatore EDS).

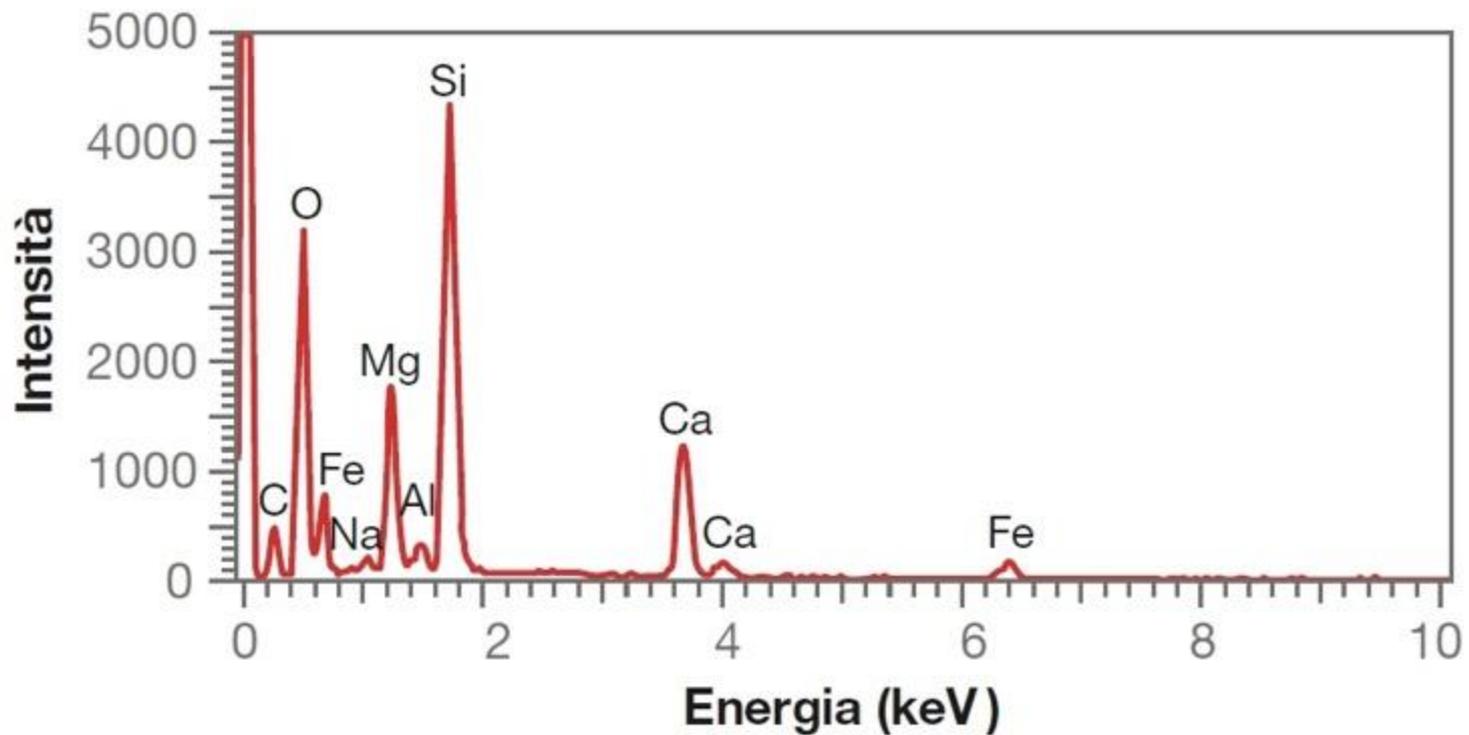


Figura 3.22 Spettro con gli elementi presenti nell'augite, ottenuto con un rivelatore a dispersione di energia (EDS) installato su di una microsonda (EMPA). Questo spettro qualitativo consente di individuare la presenza di O, Si, Ca, Al, Fe, Mg e Na. Il picco del carbonio, C, è dovuto a un sottilissimo rivestimento (di carbonio) applicato alla superficie del campione per renderla conduttiva. (Mike Spilde, Istituto di meteoritica, Università del New Mexico.)

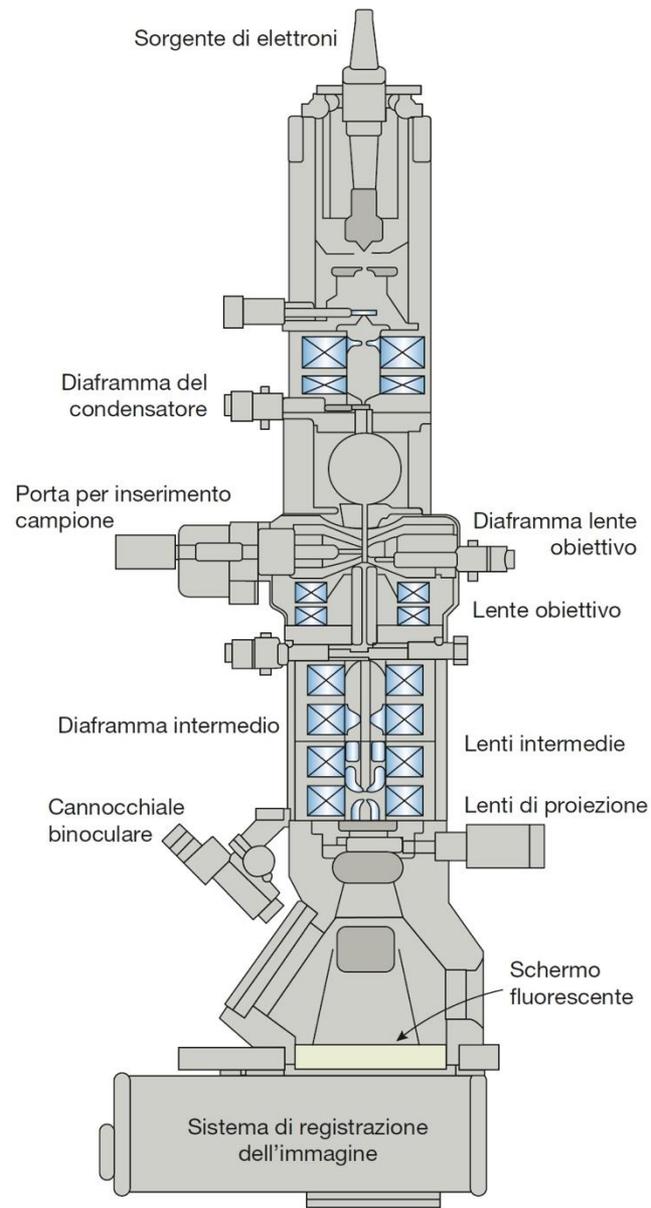


Figura 3.23 Schema di microscopio elettronico a trasmissione (TEM). Le lenti sono elettromagnetiche.