

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TERAMO

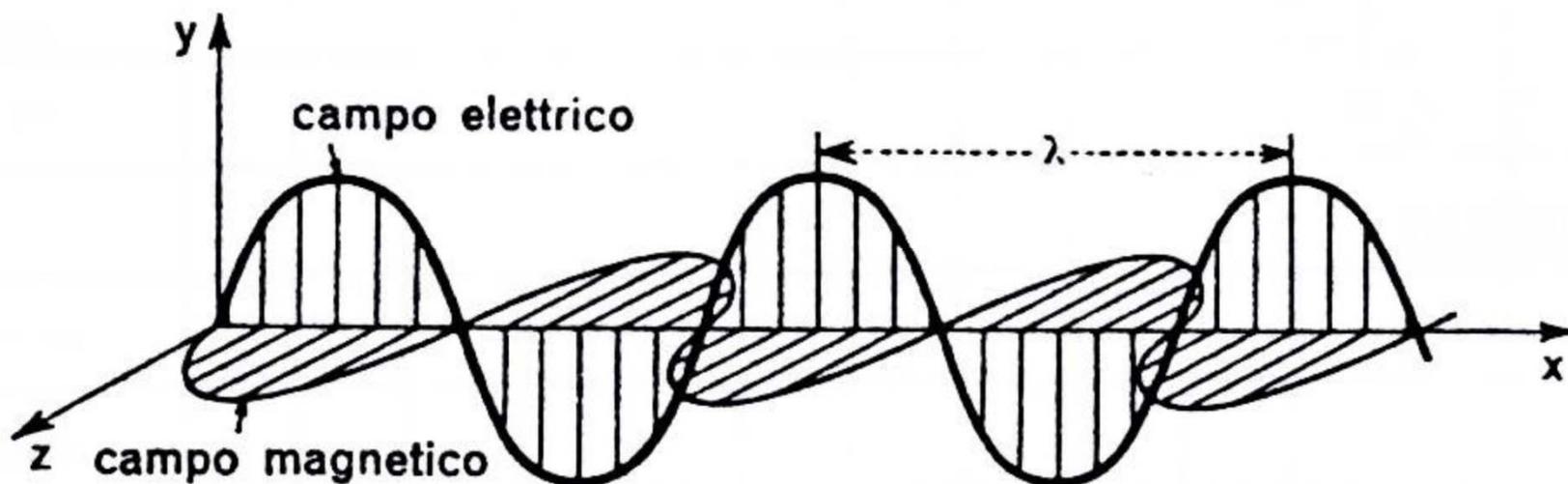
**Intensificazione sostenibile delle produzioni
ortofrutticole di qualità - 1° anno**

**Elementi di chimica analitica del
suolo e dei fitofarmaci (4 CFU)**

Prof. Marcello Mascini

mmascini@unite.it

I metodi spettroscopici si basano sulla interazione e misura della radiazione elettromagnetica con l'analita.



Le radiazioni (o onde) elettromagnetiche consistono in una forma di energia che si propaga, anche nel vuoto: sono la simultanea propagazione nello spazio delle oscillazioni di un campo elettrico e di un campo magnetico.

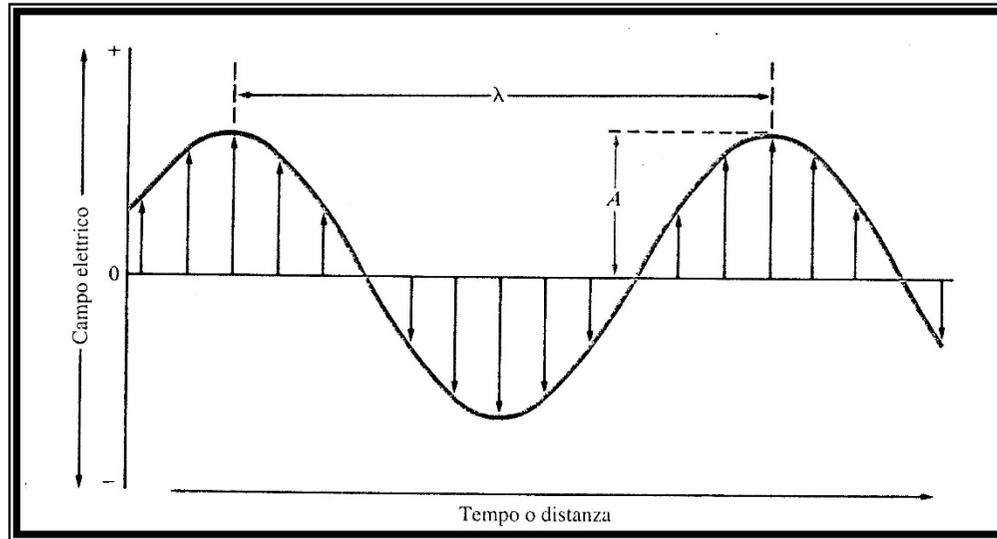
Classificazione

Si possono dividere generalmente in:

- metodi di *assorbimento* (attenuazione di un fascio di radiazione)
- metodi di *emissione* (radiazione emessa dall'analita in particolari condizioni sperimentali)

Più in dettaglio vengono classificati in base alla regione dello spettro elettromagnetico coinvolta

LE ONDE ELETTROMAGNETICHE



Ampiezza (A) = lunghezza del vettore elettrico al massimo dell'onda

Lunghezza d'onda (λ) = distanza tra i massimi (o i minimi) successivi

Frequenza (ν) = numero di oscillazioni del campo elettrico al secondo
(1 Hz = 1 ciclo al secondo)

Velocità di propagazione (v) = $v\lambda$ dipende dal mezzo in cui si propaga la radiazione

$$E = h\nu$$

 ***ENERGIA E FREQUENZA SONO DIRETTAMENTE PROPORZIONALI***

$$h = \text{costante di Planck} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} \quad \rightarrow \quad E = hc / \lambda$$

Numero d'onda ($\bar{\nu}$) = numero di onde per cm $1/\lambda$

Potenza (P) = energia per unità di area al secondo. Correlata all'ampiezza della radiazione

Ampiezza (A) = lunghezza del vettore elettrico al massimo dell'onda

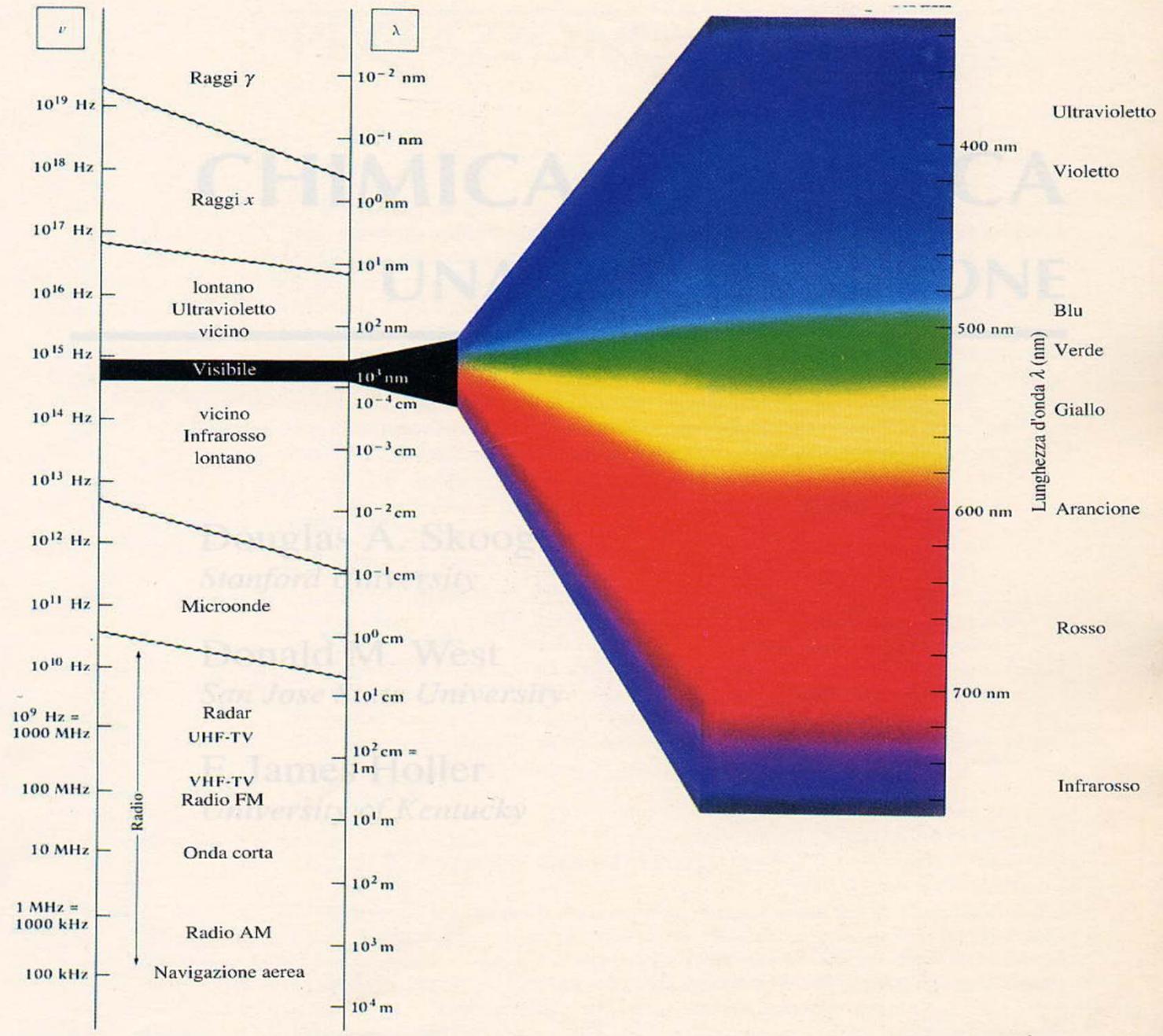
Lunghezza d'onda (λ) = distanza tra i massimi (o i minimi) successivi

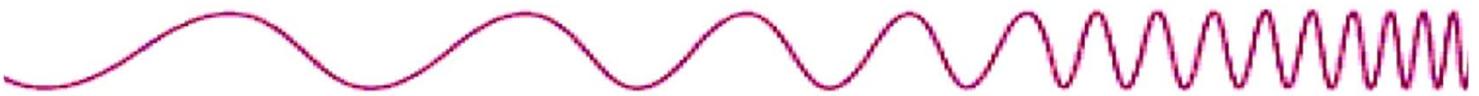
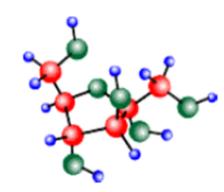
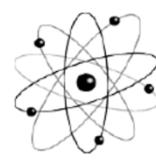
Frequenza (ν) = numero di oscillazioni del campo elettrico al secondo (1 Hz = 1 ciclo al secondo)

Velocità di propagazione (v) = $v\lambda$ dipende dal mezzo in cui si propaga la radiazione

Spettro elettromagnetico

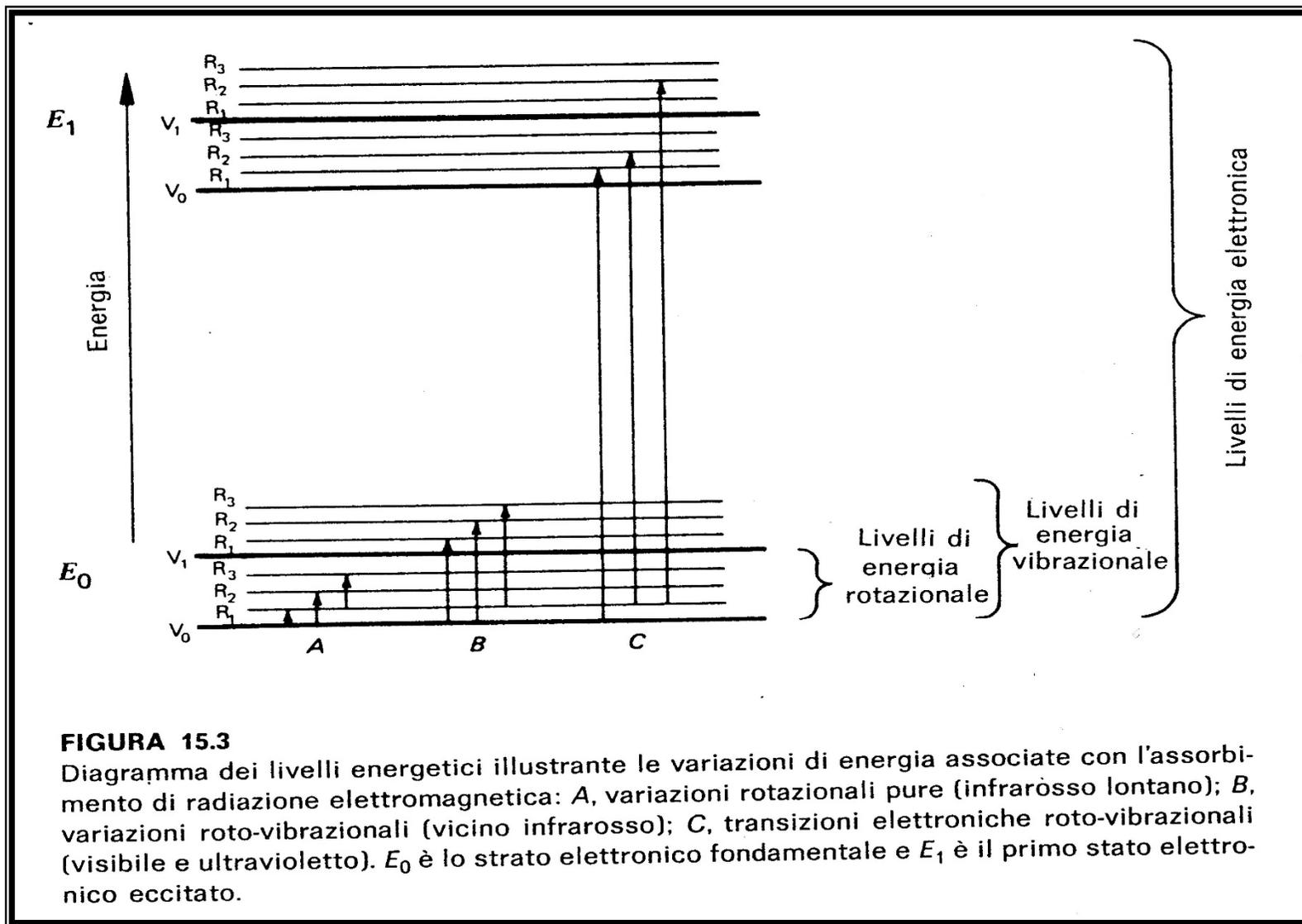
Spettro visibile



<i>Tipi di radiazione</i>						
<i>onde radio</i>	<i>micro- onde</i>	<i>raggi IR</i>	<i>luce visibile</i>	<i>raggi UV</i>	<i>raggi X</i>	<i>raggi gamma</i>
10^7	10^{10}	10^{12}	10^{14}	10^{15}	10^{17}	10^{20}
ordini di grandezza (in Hz) delle FREQUENZE						
bassa V bassa E alta λ						alta V alta E bassa λ
ordini di grandezza (in cm) delle LUNGHEZZE D'ONDA						
10^3	1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-11}
						

Tipo di variazione quantica:	Cambiamento di spin	Cambiamento di orientazione	Cambiamento di configurazione	Cambiamento di distribuzione elettronica	Cambiamento di configurazione nucleare		
	10^{-2}	1	100	10^4	10^6	Numero d'onda, cm^{-1} 10^8	
10 m	100 cm	1 cm	100 μm	1000 nm	10 nm	Lunghezza d'onda 100 pm	
3×10^6	3×10^8	3×10^{10}	3×10^{12}	3×10^{14}	3×10^{16}	Frequenza, Hz 3×10^{18}	
10^{-3}	10^{-1}	10	10^3	10^5	10^7	Energia, j/mol 10^9	
Tipo di spettroscopia	NMR	ESR	Microonde	Infrarosso	Visibile e Ultravioletto	Raggi X	Raggi γ

Assorbimento della radiazione



SPETTROFOTOMETRIA UV/visibile

Quali elettroni danno luogo a transizioni misurabili nell'UV/visibile?

Gli elettroni in una molecola possono essere classificati in 4 tipi:

- elettroni non coinvolti in legami (E di eccitazione alte)
- elettroni di legami singoli covalenti (s) (E troppo alte per UV/visibile)
- elettroni non leganti (tipo n) (E sufficienti per UV/visibile)
- elettroni in orbitali p (legami doppi e tripli) (E sufficienti per UV/visibile)

Le transizioni avvengono in orbitali *antileganti* di tipo s^* e p^* , le più comuni sono $p \rightarrow p^*$.

L'intensità relativa delle bande di assorbimento è rappresentata dalle *assorbività molari* e che sono una misura della probabilità che la transizione elettronica abbia luogo. La probabilità di transizioni $p \rightarrow p^*$ è maggiore di transizioni $n \rightarrow p^*$

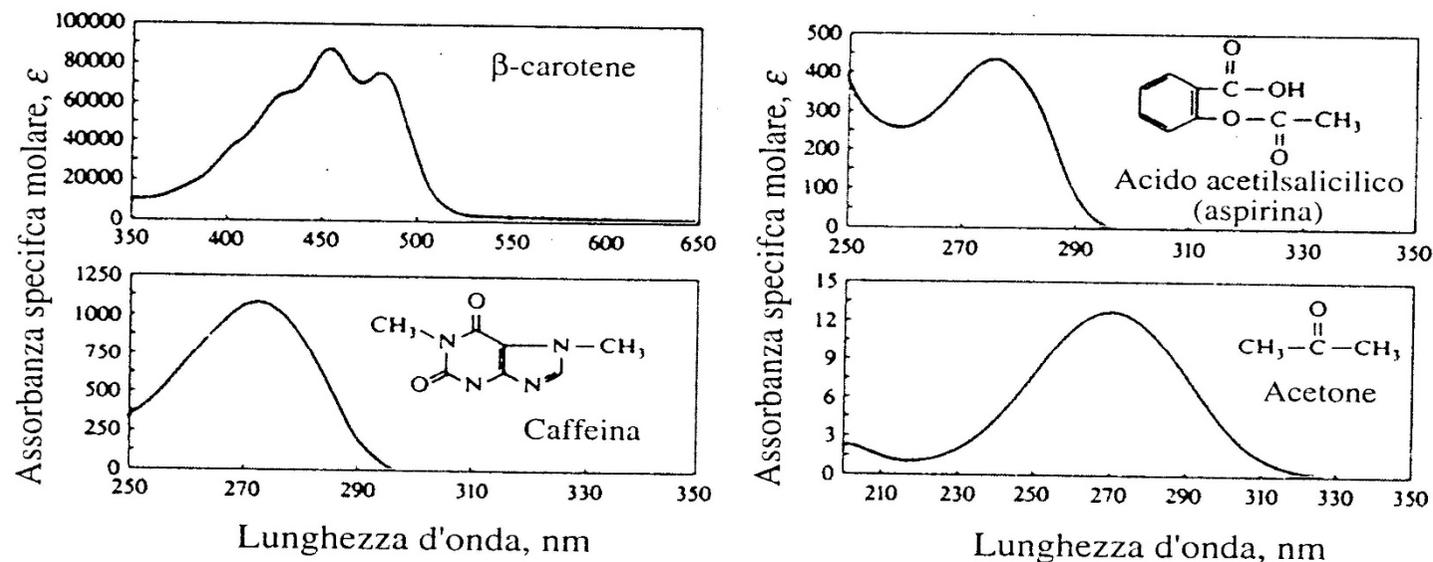


Figura 21-11
Spettri UV di composti organici tipici.

I gruppi che assorbono in una molecola sono chiamati **cromofori**.

Le variazioni spettrali vengono classificate come *batocromiche* (massimo spostato verso λ maggiori) e *ipsocromiche* (verso λ minori). Variazioni d'intensità vengono indicate come *ipercromiche* o *ipocromiche*.

Tabella 21-2

Caratteristiche di assorbimento di alcuni tipici cromofori organici

Cromoforo	Esempio	Solvente	λ_{\max} , nm	ϵ_{\max}
Alchene	$C_6H_{13}CH=CH_2$	<i>n</i> -eptano	177	13000
Alchene coniugato	$CH_2=CHCH=CH_2$	<i>n</i> -eptano	217	21000
Alchino	$C_5H_{11}C\equiv C-CH_3$	<i>n</i> -eptano	178	10000
			196	2000
			225	160
Carbonile	$\begin{array}{c} O \\ \\ CH_3CCH_3 \end{array}$	<i>n</i> -esano	186	1000
			280	16
	$\begin{array}{c} O \\ \\ CH_3CH \end{array}$	<i>n</i> -esano	180	grande
			293	12
Carbossile	$\begin{array}{c} O \\ \\ CH_3COH \end{array}$	etanolo	204	41
Ammide	$\begin{array}{c} O \\ \\ CH_3CNH_2 \end{array}$	acqua	214	60
Azo	$CH_3N=NCH_3$	etanolo	339	5
Nitro	CH_3NO_2	isooctano	280	22
Nitroso	C_4H_9NO	etere etilico	300	100
			665	20
Nitrato	$C_2H_5ONO_2$	diossano	270	12
Aromatico	Benzene	<i>n</i> -esano	204	7.900
			256	200

LEGGE DI LAMBERT-BEER

$$\text{Trasmittanza (T)} = P/P_0$$

$$T\% = P/P_0 \times 100$$

$$\text{Assorbanza} = \log P_0/P = -\log T$$

Legge di Beer:

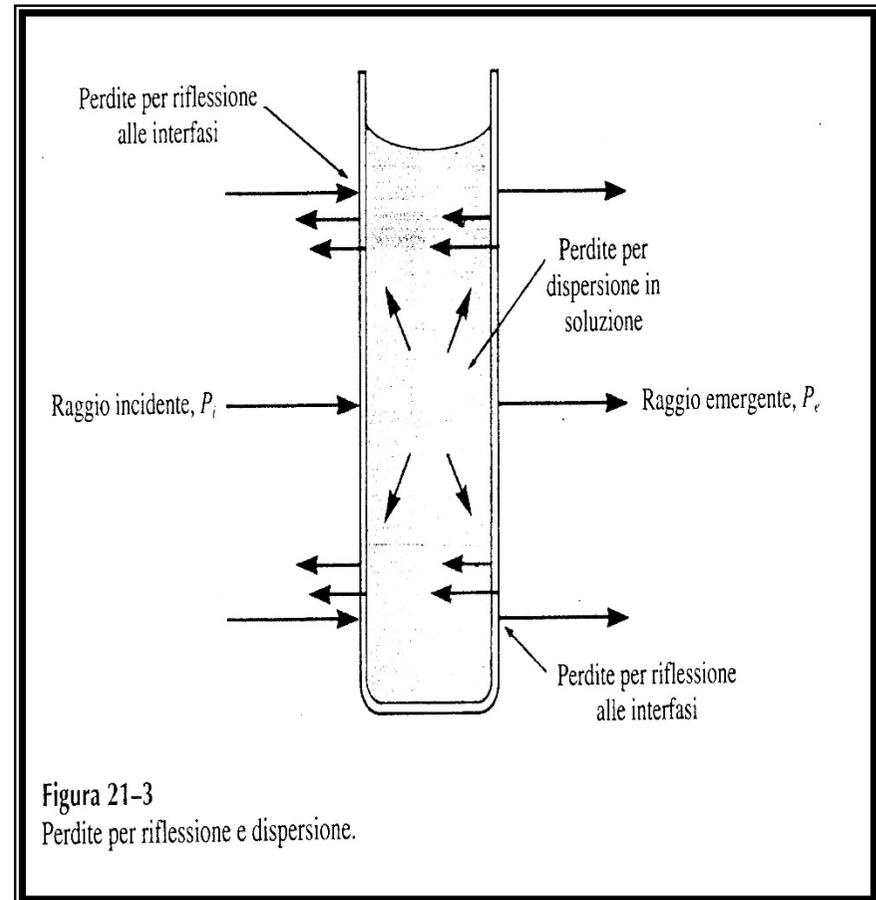
$$A = ebc$$

e = assorbività (o assorbanza specifica)
molare

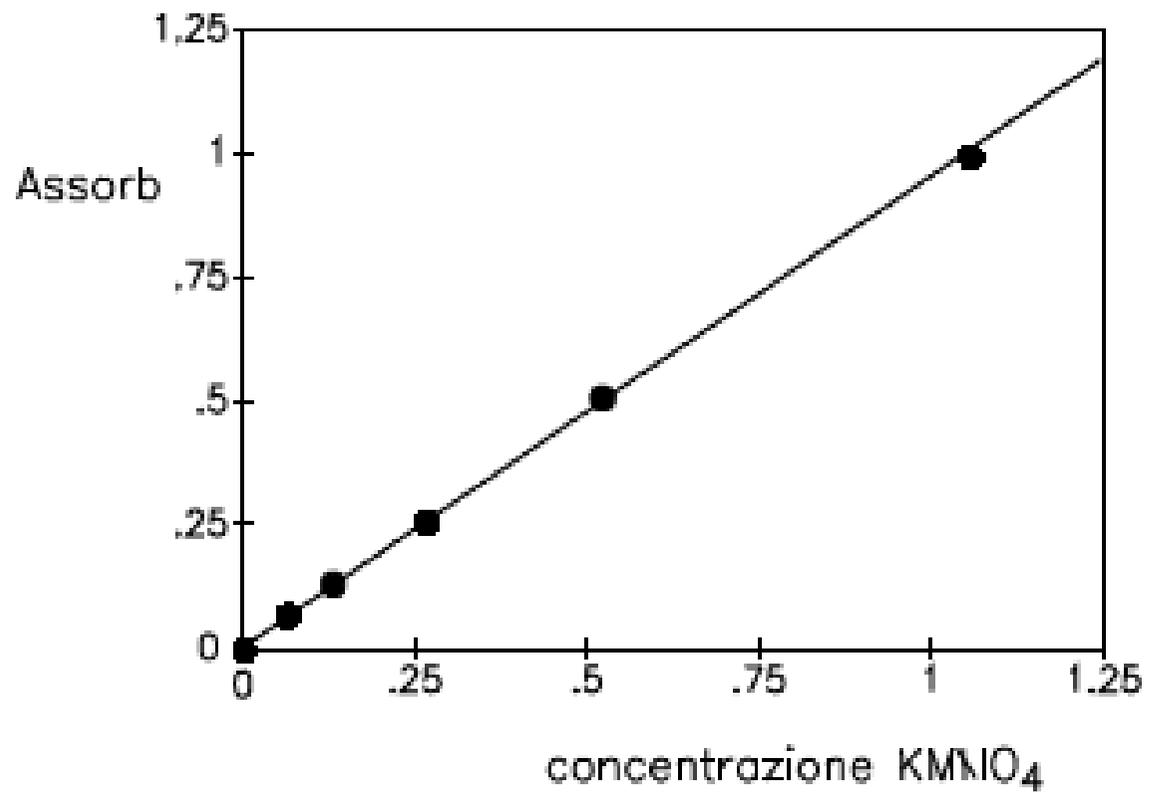
b = cammino ottico

c = concentrazione

(vale per soluzioni diluite)

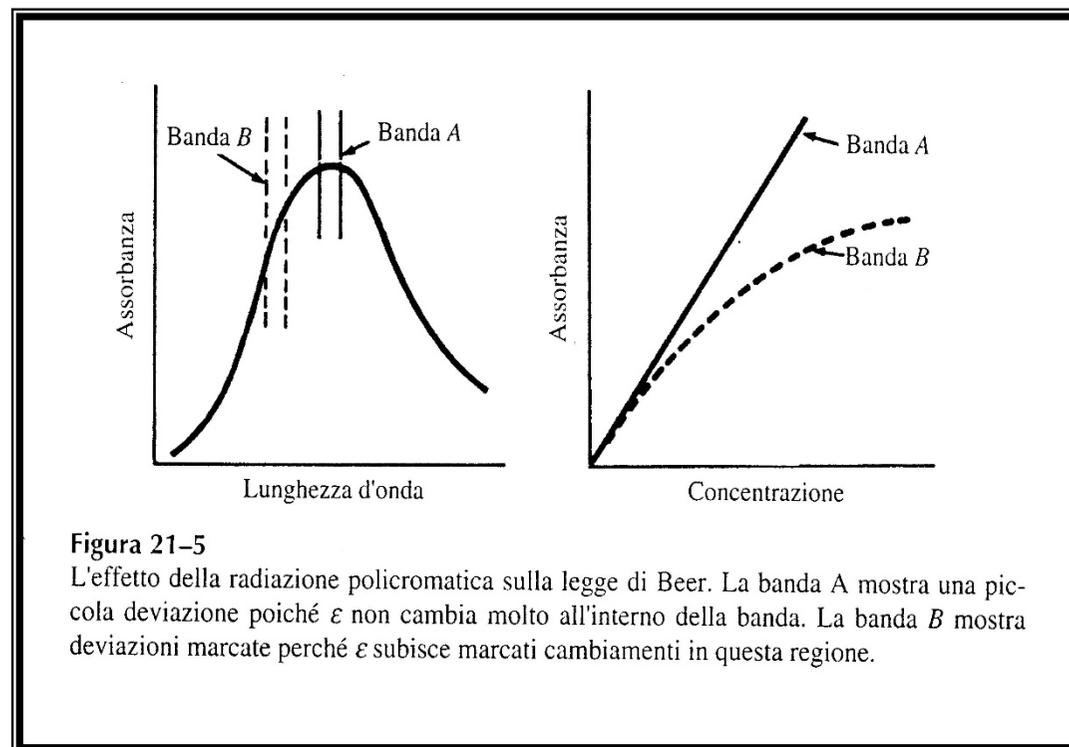


LEGGI DI LAMBERT-BEER



DEVIAZIONI DALLA LEGGE DI BEER

- chimiche → Le specie assorbenti danno reazioni di associazione, dissociazione o reazione con solvente con prodotti che hanno ϵ diversi (p.es. un indicatore acido-base in soluzione non tamponata)
- strumentali → Dovute a radiazioni spurie e al fatto che si usa radiazione policromatica per l'assorbimento.



ERRORE SPETTROFOMETRICO

$$A = \epsilon bc = \log P_0 / P = \log P_0 - \log P$$

- Per A bassi $\rightarrow \Delta$ piccolo tra N grandi \rightarrow RSD grande
- Per A alti $\rightarrow P$ poco accurato \rightarrow RSD grande

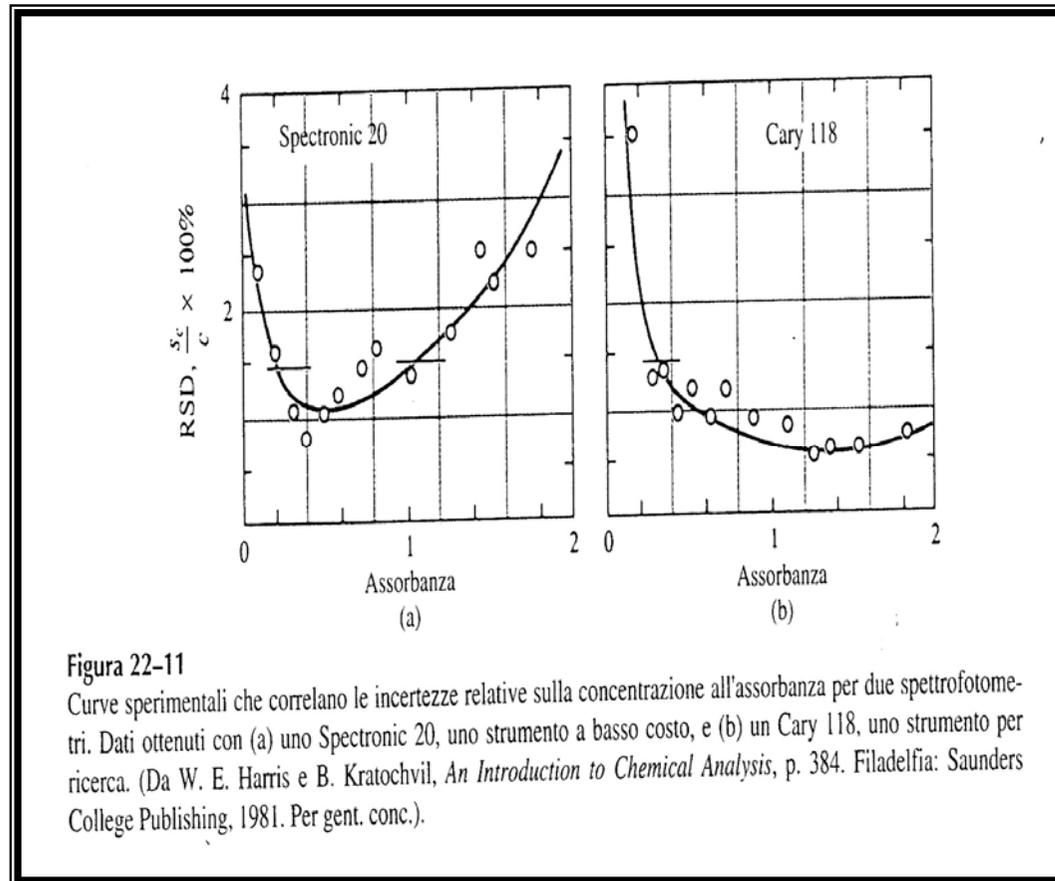
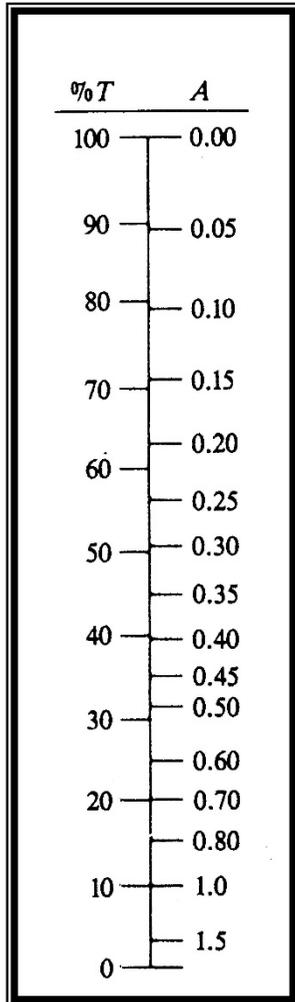
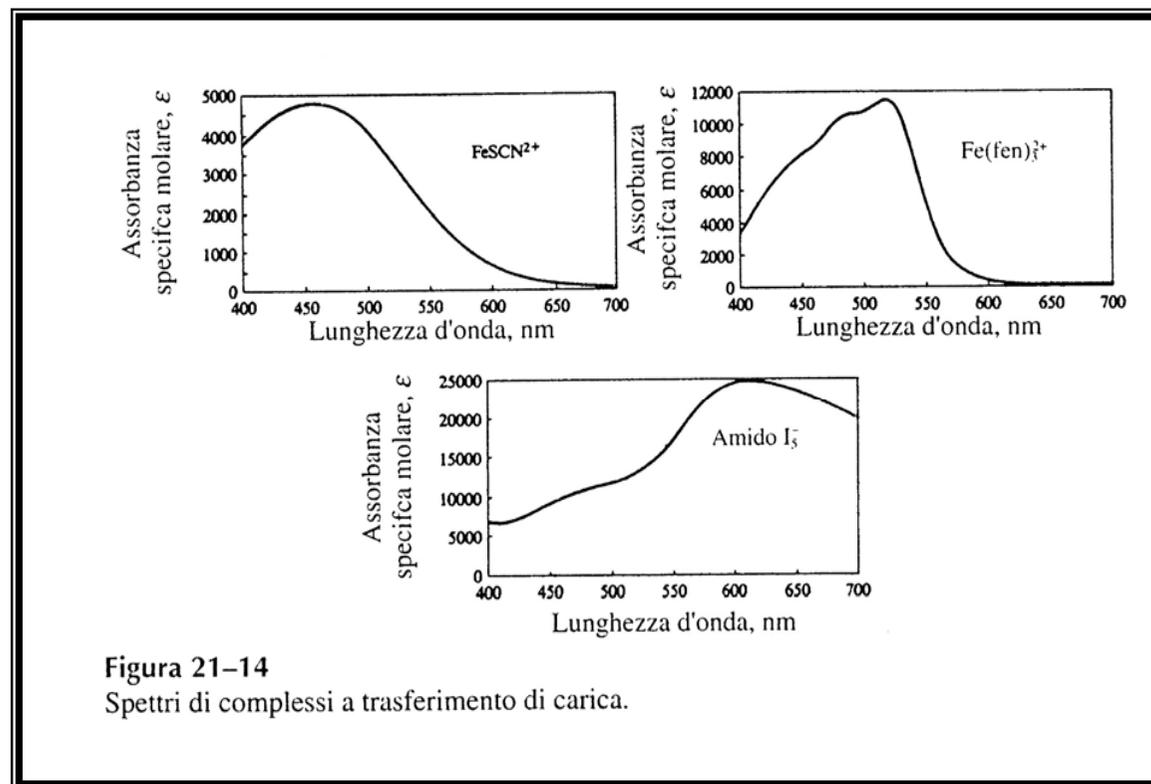


Figura 22-11

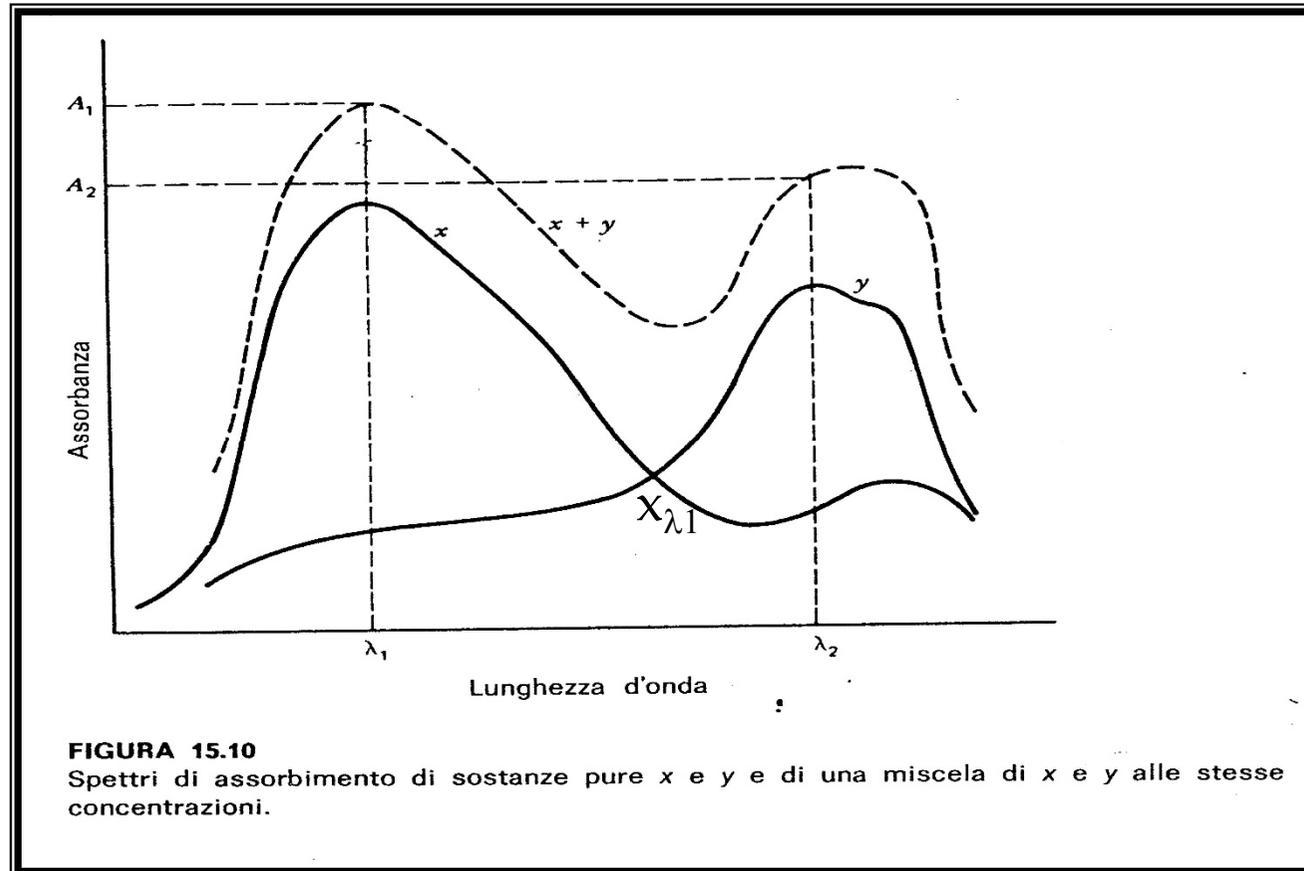
Curve sperimentali che correlano le incertezze relative sulla concentrazione all'assorbanza per due spettrofotometri. Dati ottenuti con (a) uno Spectronic 20, uno strumento a basso costo, e (b) un Cary 118, uno strumento per ricerca. (Da W. E. Harris e B. Kratochvil, *An Introduction to Chemical Analysis*, p. 384. Filadelfia: Saunders College Publishing, 1981. Per gent. conc.).

Assorbimento a trasferimento di carica

- Sono coinvolti complessi detti “a trasferimento di carica”
- Possono avere ϵ molto grandi (>10000)
- Viene ceduto un elettrone ad un orbitale del metallo (o vv)



Additività delle assorbanze



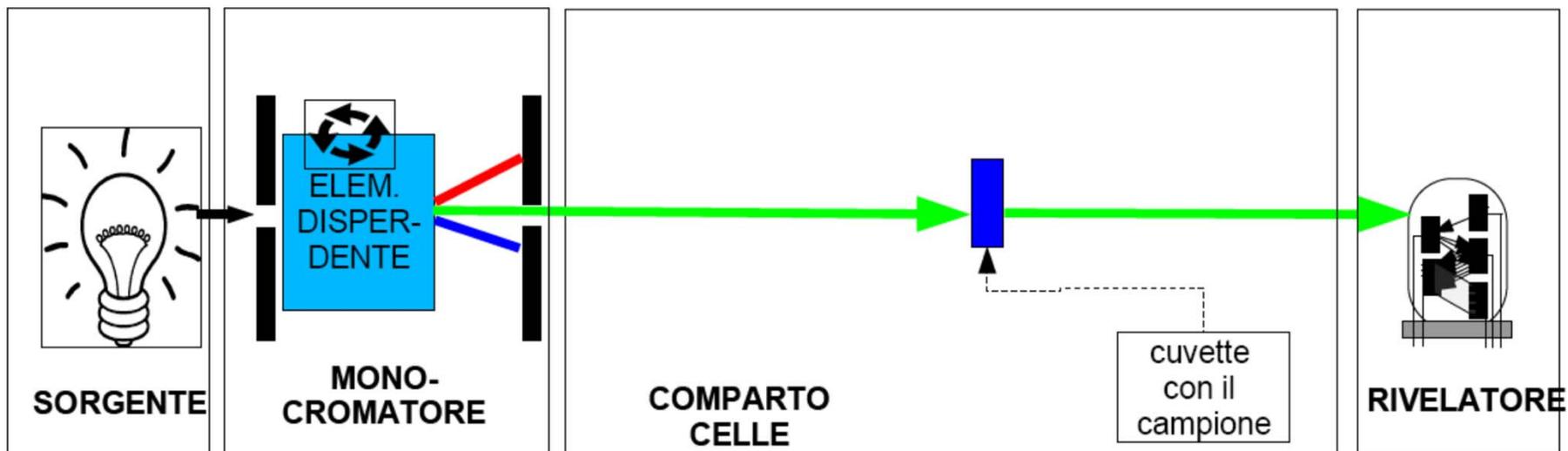
$$A_{1x(\lambda_1)} = \epsilon_{x(\lambda_1)} b c_x$$

$$A_{1y(\lambda_1)} = \epsilon_{y(\lambda_1)} b c_y$$

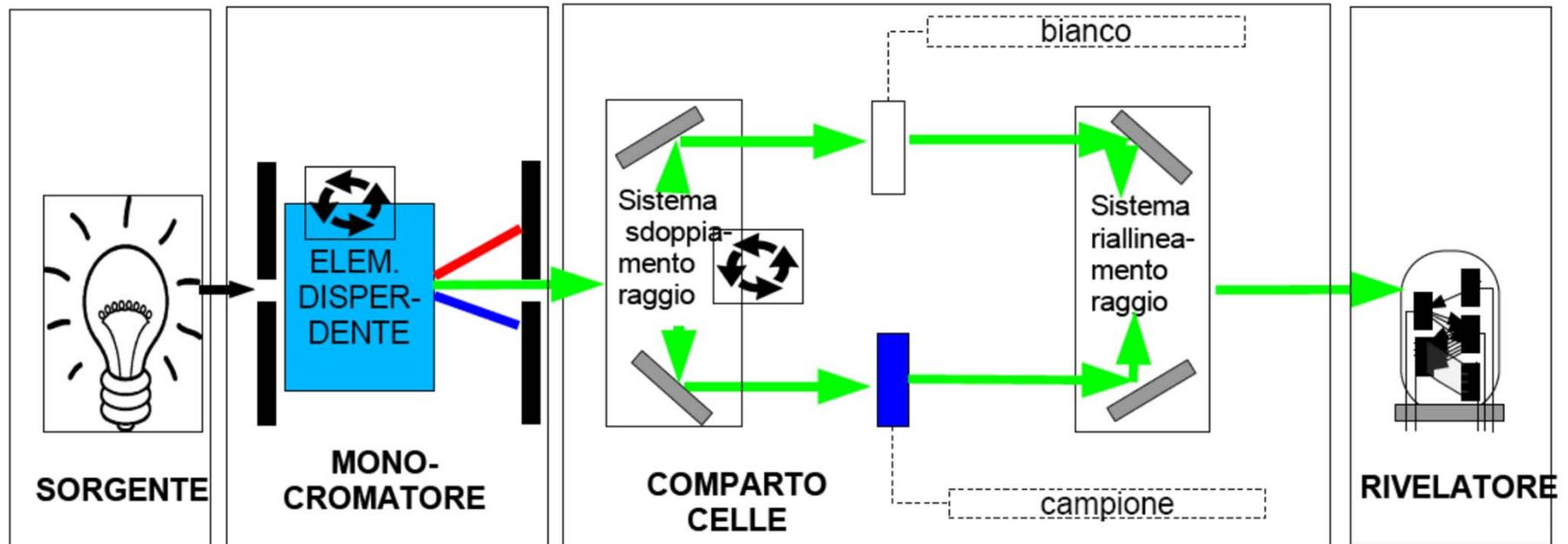
$$A_{2x(\lambda_2)} = \epsilon_{x(\lambda_2)} b c_x$$

$$A_{2y(\lambda_2)} = \epsilon_{y(\lambda_2)} b c_y$$

SCHEMA DI UNO SPETTROFOTOMETRO (MONORAGGIO)



SCHEMA DI UNO SPETTROFOTOMETRO (DOPPIO RAGGIO)



Sorgenti

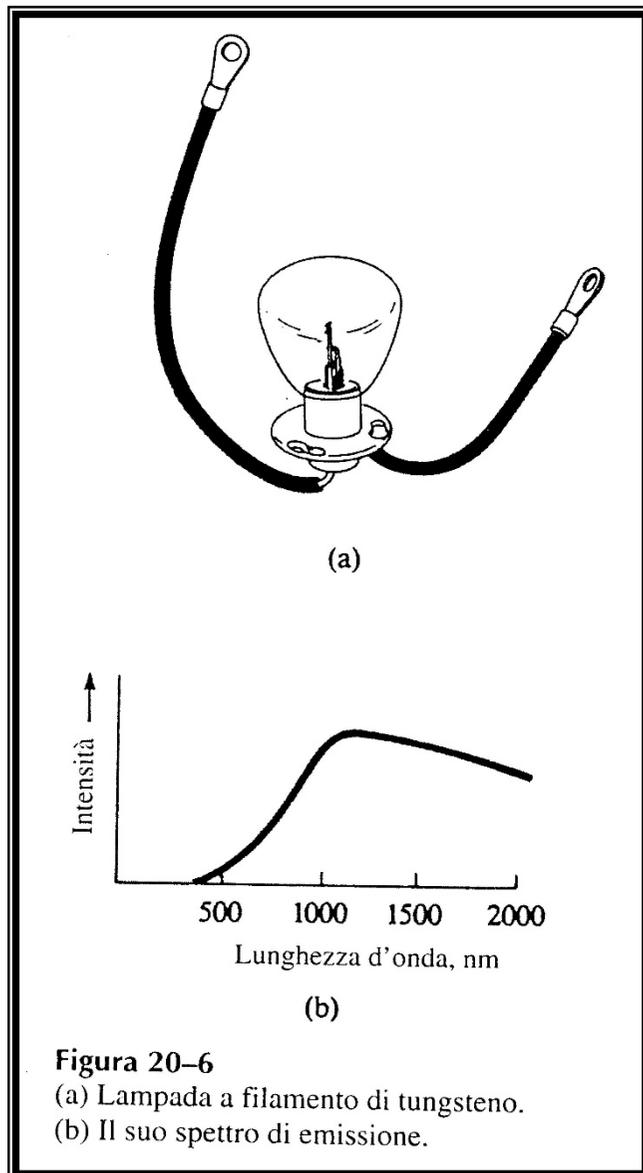


Figura 20-6

(a) Lampada a filamento di tungsteno.
(b) Il suo spettro di emissione.

Tabella 20-1

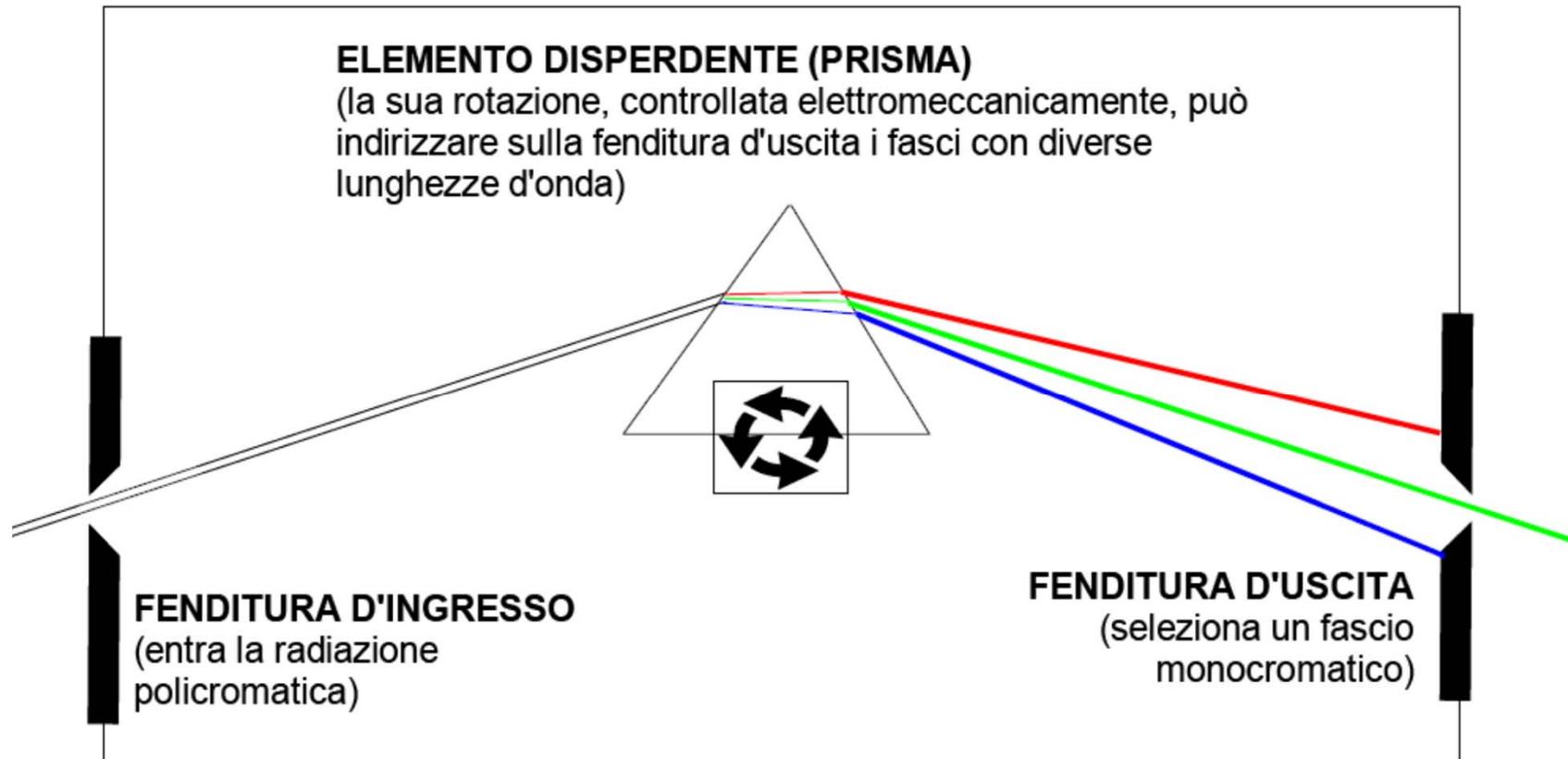
Sorgenti continue per la spettroscopia ottica

Sorgente	Regione di lunghezza d'onda, nm	Tipo di spettroscopia
Lampada a Xeno	250-600	Fluorescenza molecolare
Lampada a H ₂ e D ₂	160-380	Molecolare di assorbimento UV
Lampada tungsteno/alogeno	240-2500	Molecolare di assorbimento UV/vis/vicino IR
Lampada di tungsteno	350-2200	Molecolare di assorbimento vis/vicino IR
Lampada di Nernst	400-20000	Molecolare di assorbimento IR
Filo di nichelcromo	750-20000	Molecolare di assorbimento IR
Globar	1200-40000	Molecolare di assorbimento IR

SELEZIONE DELLA LUNGHEZZA D'ONDA

Monocromatori: il prisma

Il **prisma** separa le varie componenti della luce perché l'indice di rifrazione è diverso per ciascuna λ . La dispersione non è lineare (minore per λ maggiori).

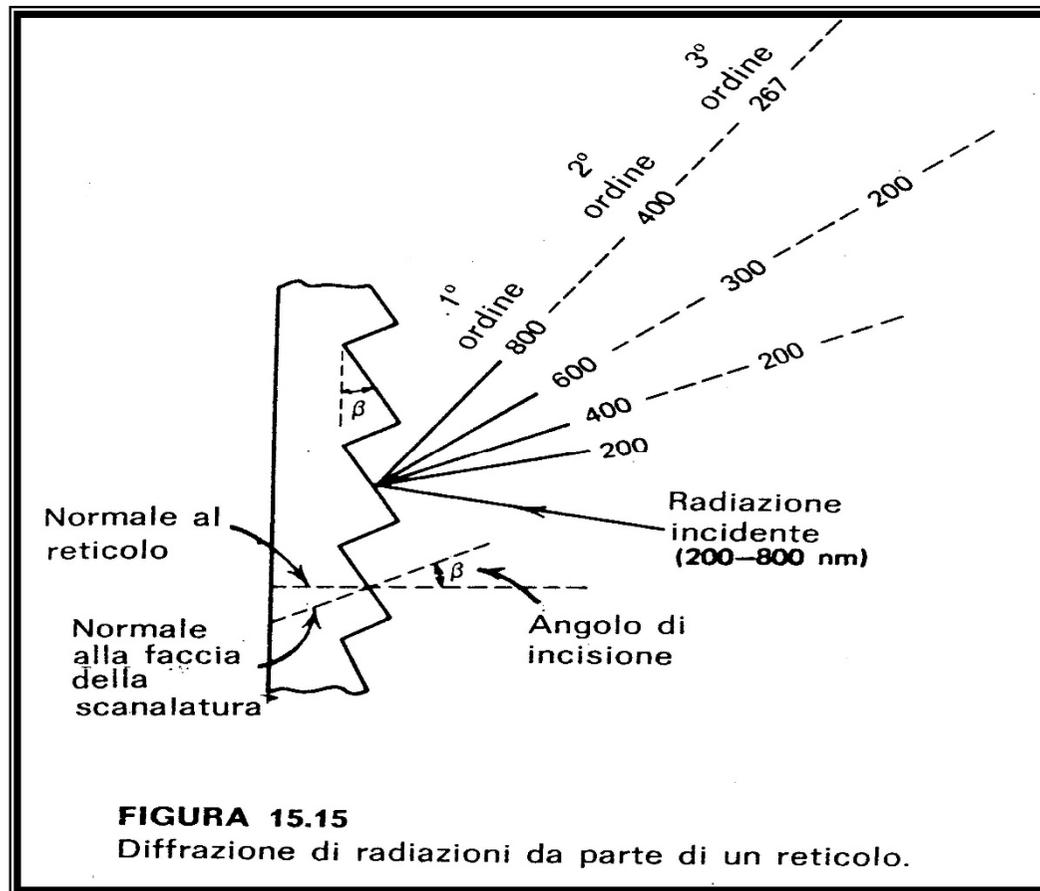


SELEZIONE DELLA LUNGHEZZA D'ONDA

Monocromatori: il reticolo a riflessione

I reticoli presentano una superficie riflettente piana di alluminio che presenta un numero grande di solchi paralleli.

La separazione dipende dalla distanza tra i solchi.



I reticoli producono anche multipli della radiazione incidente (ordini superiori).

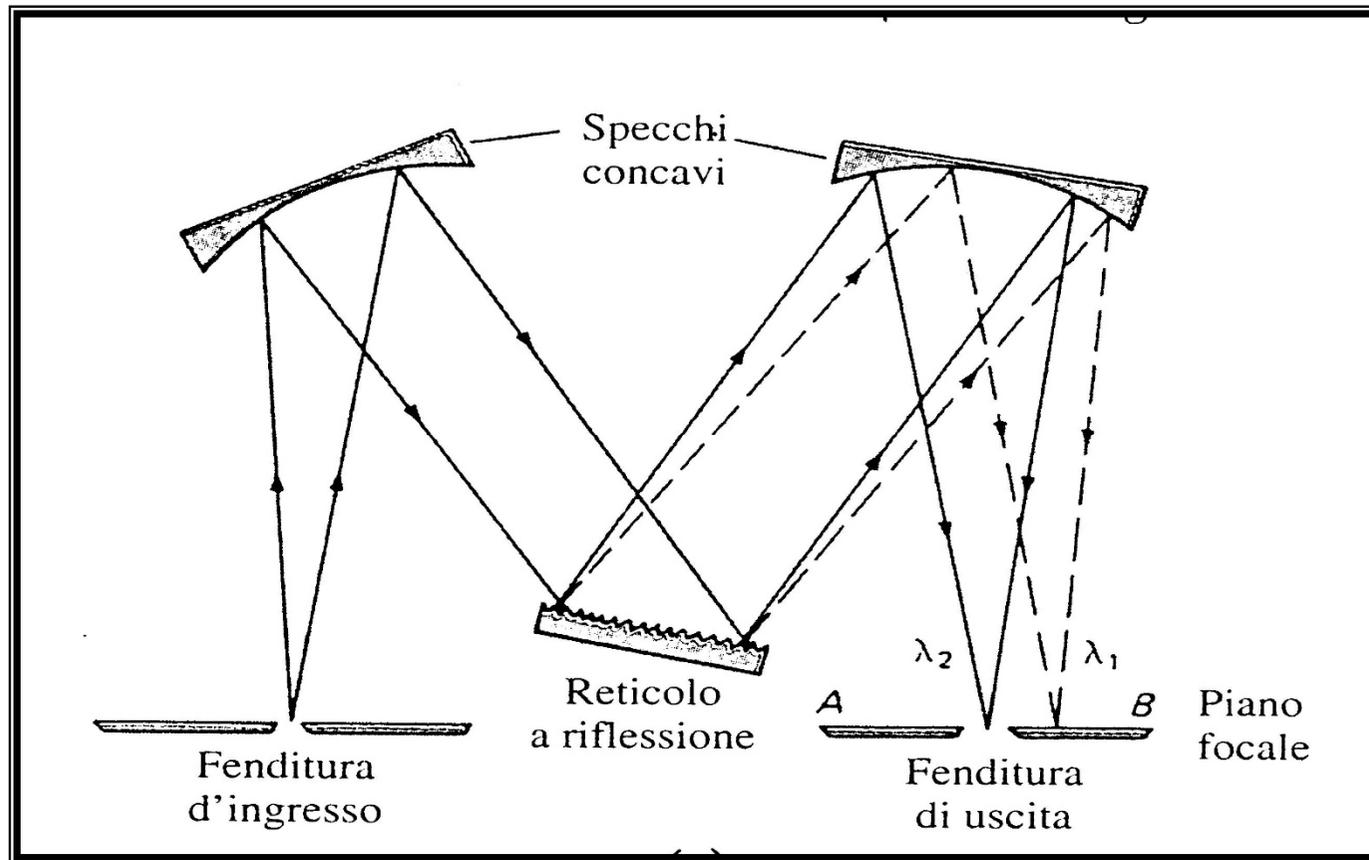
$$n\lambda = d (\sin i + \sin r)$$

d = distanza tra le superfici, n ordine di diffrazione, i e r = radiazione incidente e riflettente

La dispersione è lineare, vengono usati diversi tipi per l'UV/visibile e l'IR

MONOCROMATORI: il reticolo a riflessione

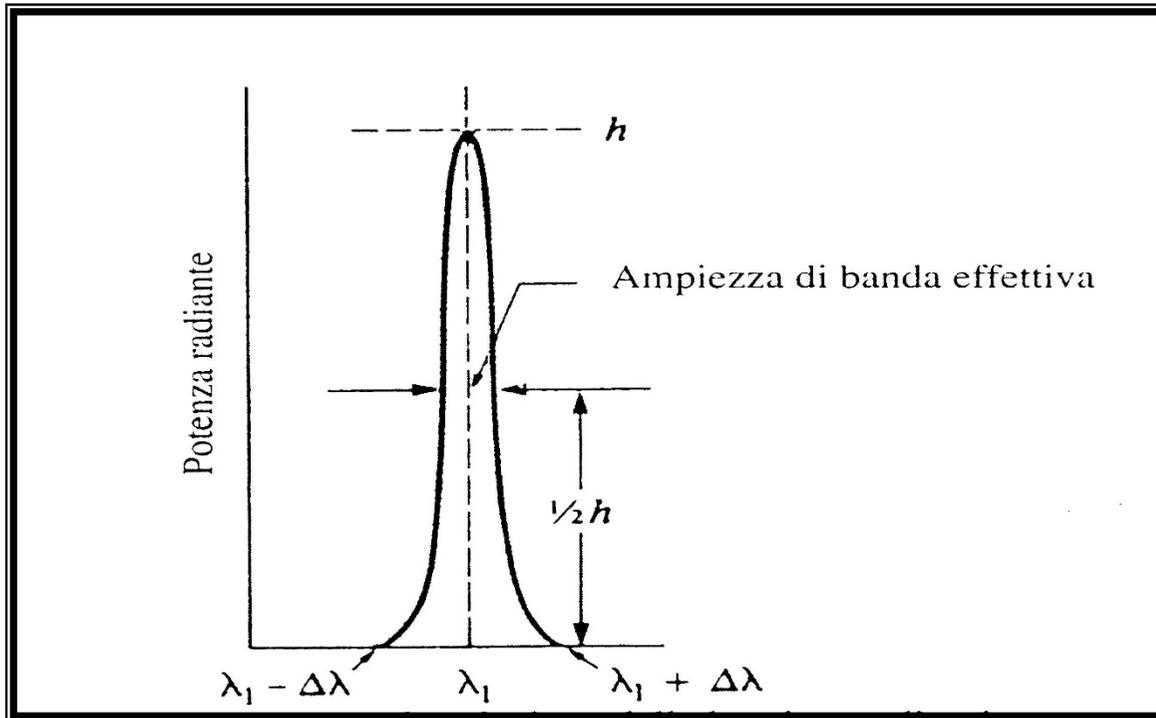
Servono a selezionare la lunghezza d'onda desiderata, consistono di *fenditure* d'ingresso e d'uscita per eliminare le radiazioni indesiderate, *un sistema di specchi* per focalizzare la radiazione e un *separatore di lunghezze d'onda* (prisma o reticolo)



SELEZIONE DELLA LUNGHEZZA D'ONDA

Monocromatori

L'ampiezza di banda effettiva del monocromatore dipende oltre che dalle caratteristiche del reticolo anche dalla *fenditura d'uscita*. Generalmente varia tra 1 e 20nm per applicazioni quantitative.



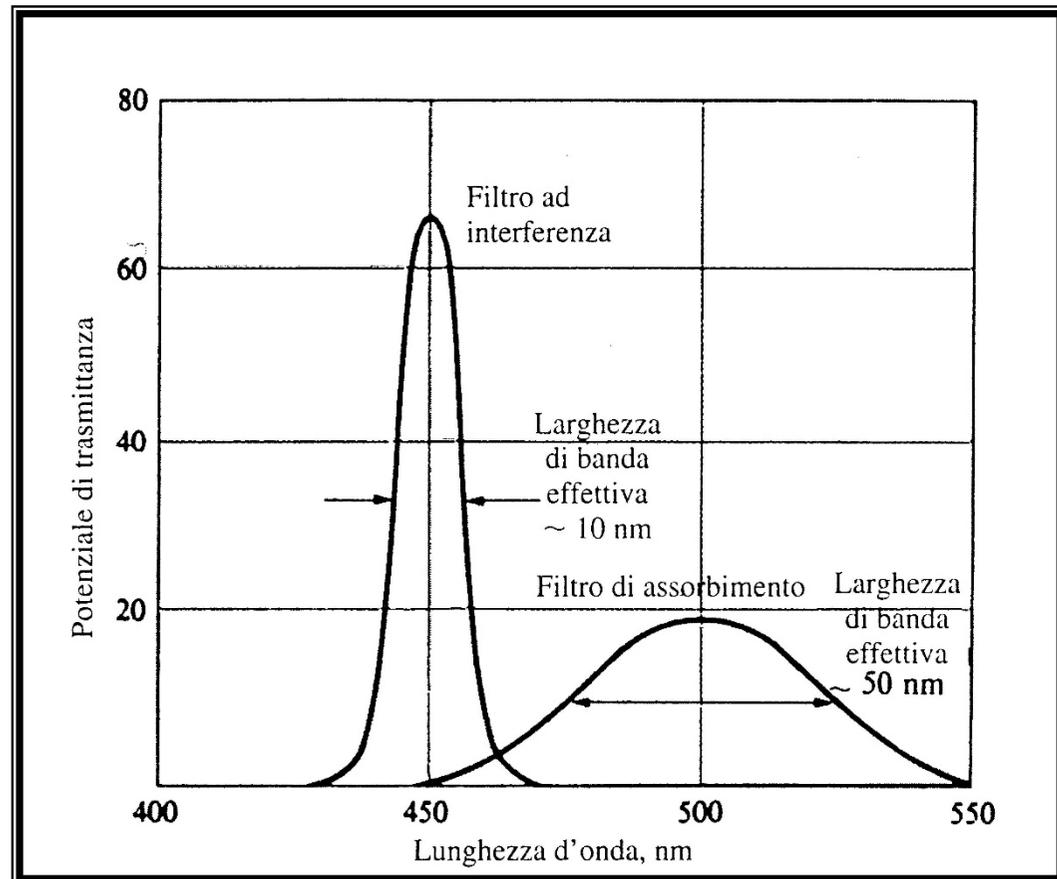
Molti monocromatori hanno fenditure variabili che permettono di lavorare con rivelatori di diversa sensibilità

SELEZIONE DELLA LUNGHEZZA D'ONDA

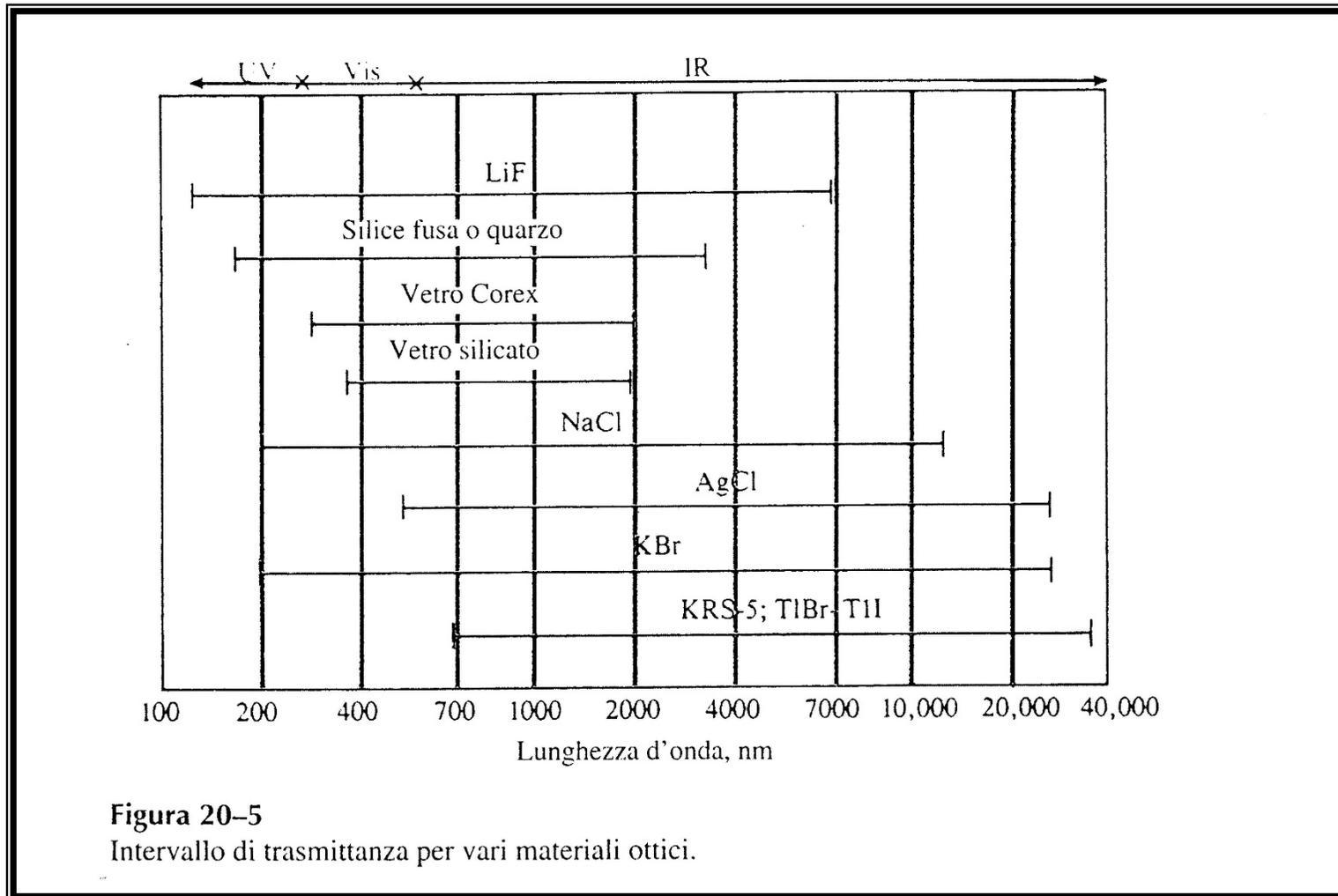
Filtri di assorbimento e ad interferenza

I *filtri* sono caratterizzati da una λ alla quale si ha la massima trasmissione e da una ampiezza di banda. Quelli ad interferenza sono più selettivi (e più costosi). Quelli ad assorbimento sono costituiti da vetro colorato.

Vengono utilizzati nel sistema ottico sia in presenza che in assenza di monocromatore (p.es. alcuni lettori per dosaggi immunochimici).

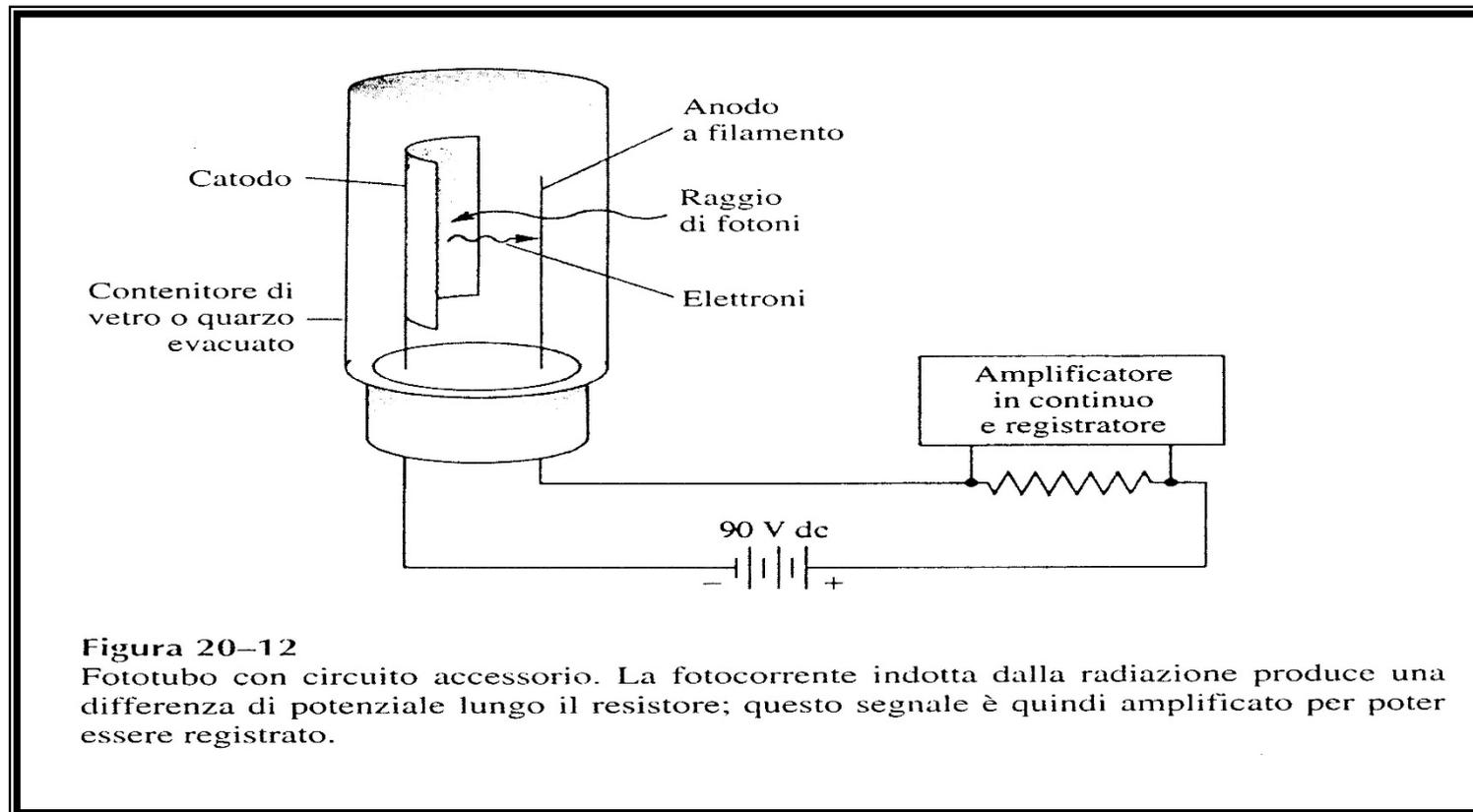


Contenitori per il campione (cuvette)

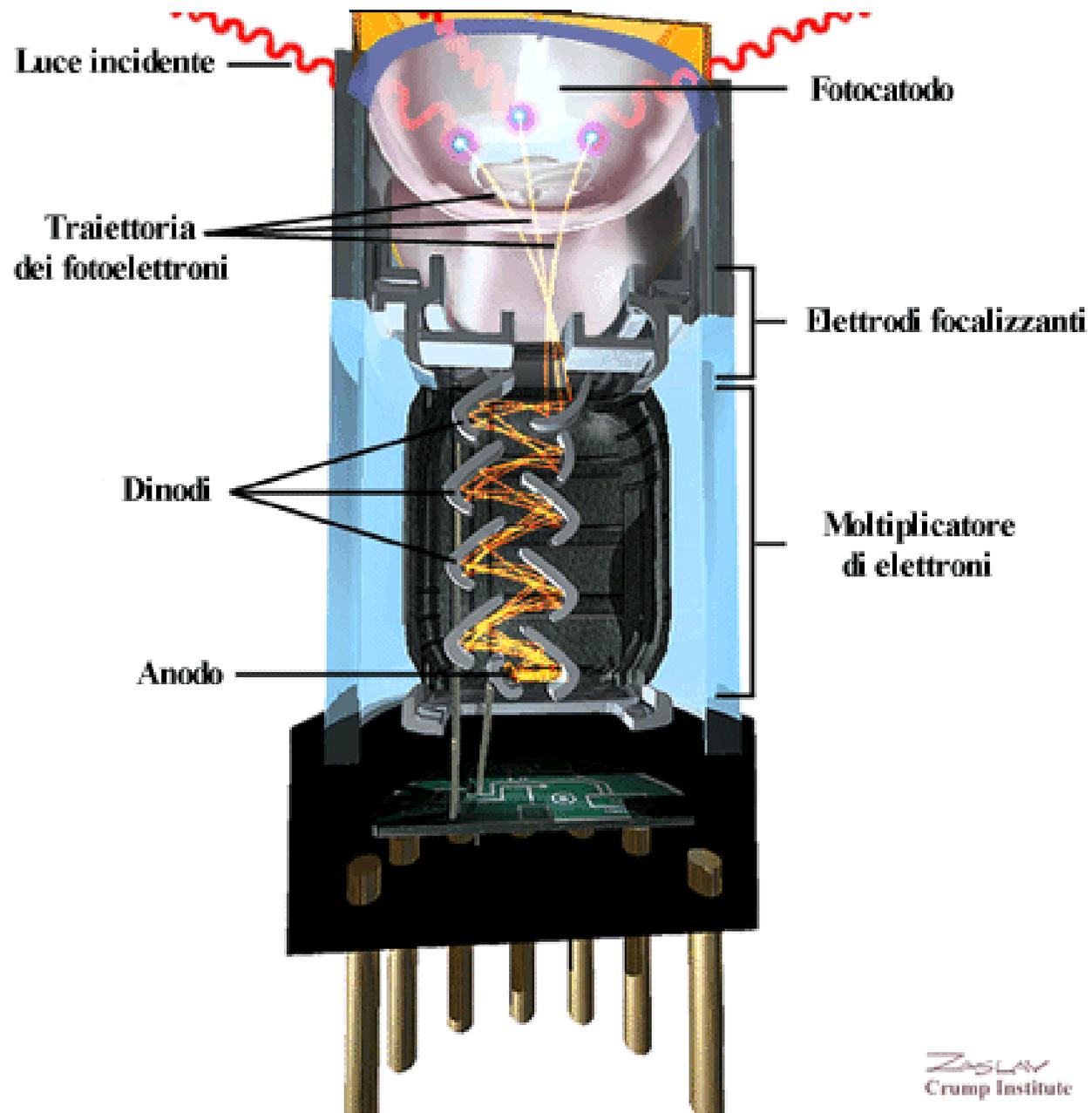


RIVELATORI PER SPETTROFOMETRI

Sono di tipo fotonico (fino a $\lambda = 2 \text{ mm}$); sono forniti di una superficie reattiva che in presenza di fotoni emette elettroni (fotoemissione) o li eccita in modo che possano condurre elettricità (fotoconduzione). I più comuni sono i *fototubi*, i *fotomoltiplicatori* e i rivelatori basati sulla tecnologia dei semiconduttori (a silicio)



Fotomoltiplicatore



ANALISI QUALITATIVA E QUANTITATIVA

- La **lunghezza d'onda** delle radiazioni emesse o assorbite sono caratteristiche delle varie sostanze:

analisi **QUALITATIVA**

- L'**intensità** delle radiazioni emesse o assorbite dipendono dalla quantità di sostanza:

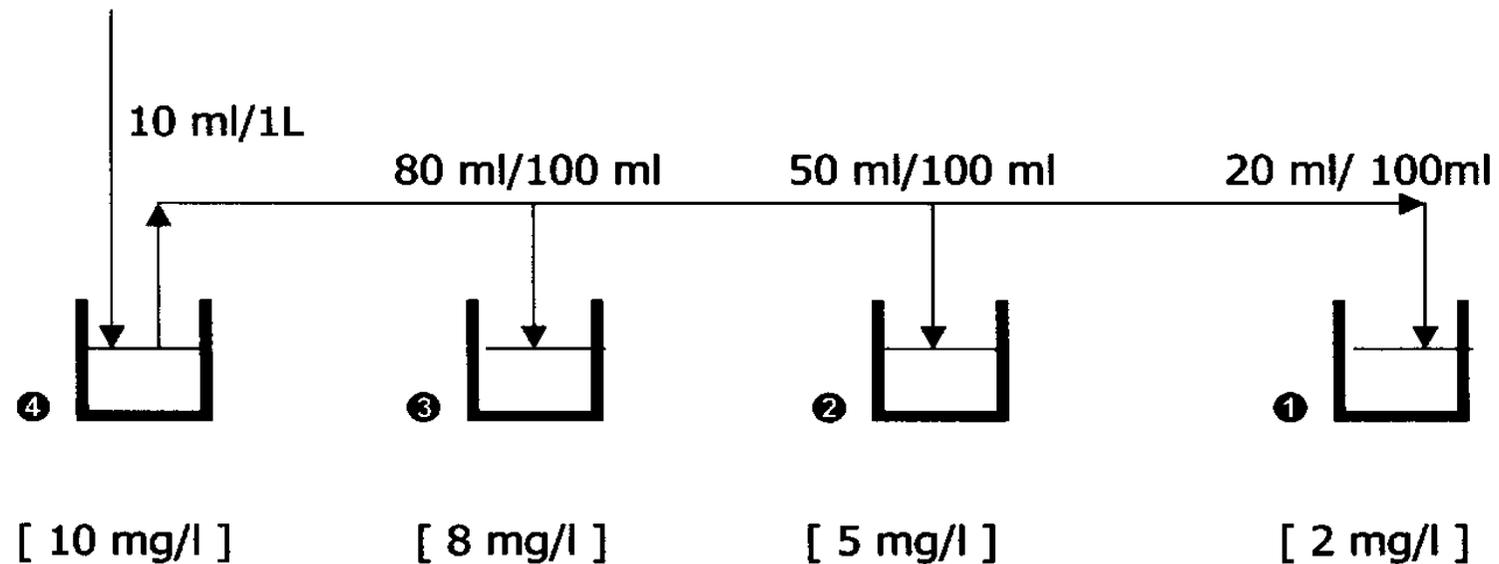
analisi **QUANTITATIVA**

ANALISI QUANTITATIVA

RETTA DI CALIBRAZIONE (TARATURA)

Tecnica delle diluizioni:

soluzione madre: 1 ml = 1 mg di campione



DATA :08/02/01

ID :Acetone

TEMPO :11:03:41

OPERATORE:espraf

No SERIE :060506

L. D' ONDA:263.0nm

CAMBIO LAMP:325nm

B. PASSANTE:2.0nm

No.STANDARDS:4

RIPETIZION:1

INTEGRAZ:1s

UNITA' ppm

TIPO CURVA:LINEARE

COEFFIC: 0.9988

EQUAZ:

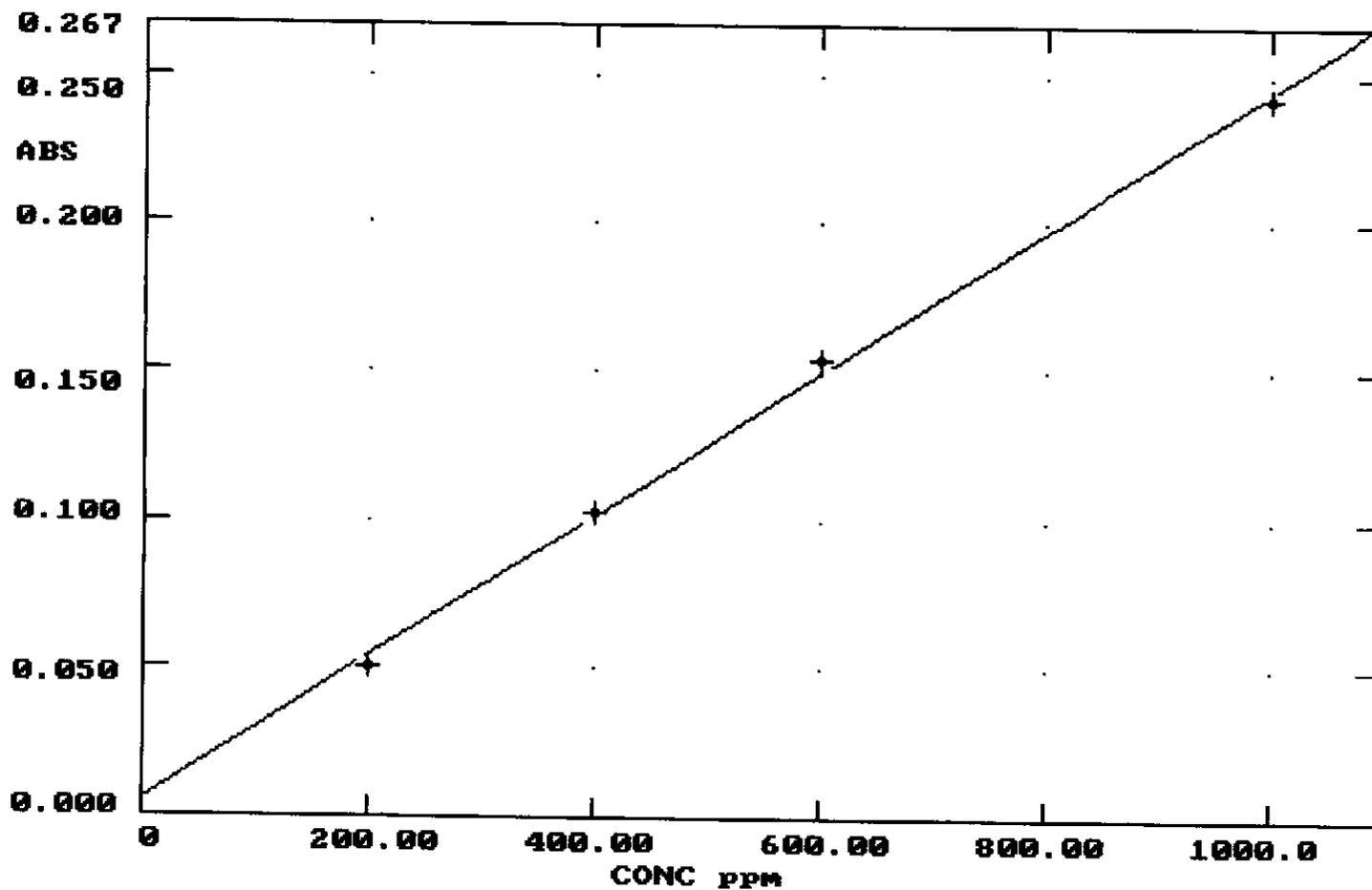
$0 \times 2 + 0.0002392x + 0.005906$

PROGR.CUVETTE2

RIF. MODO:ON

CICLI PROG CELLE1

MODO PROG CUVETTE:AUTO



1. ANALISI SPETTRALE IN ASSORBIMENTO

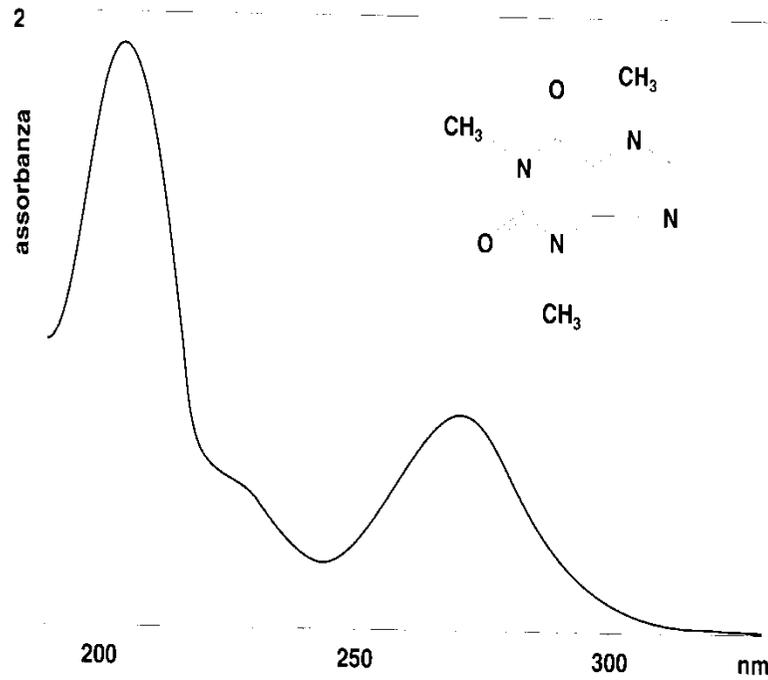


Fig. 1.9 Spettro di assorbimento della caffeina.

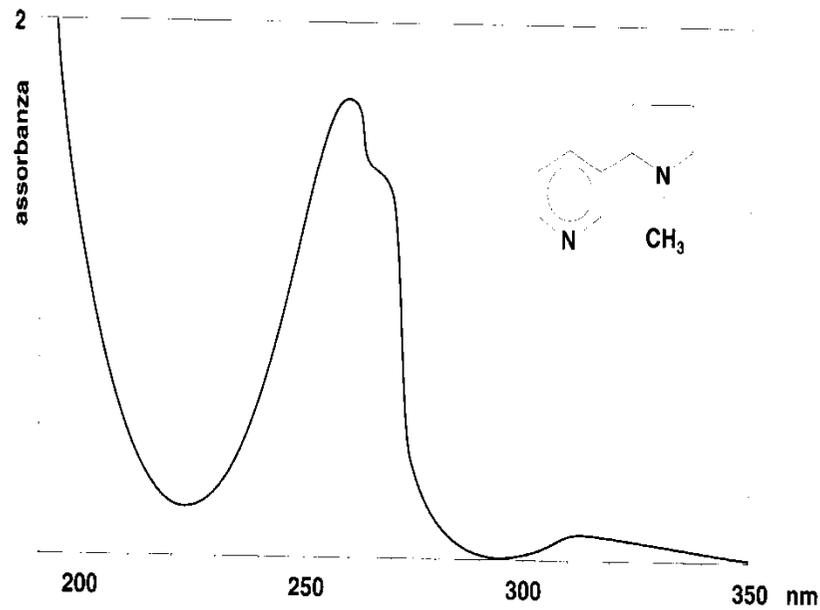


Fig. 1.10 Spettro di assorbimento della nicotina.

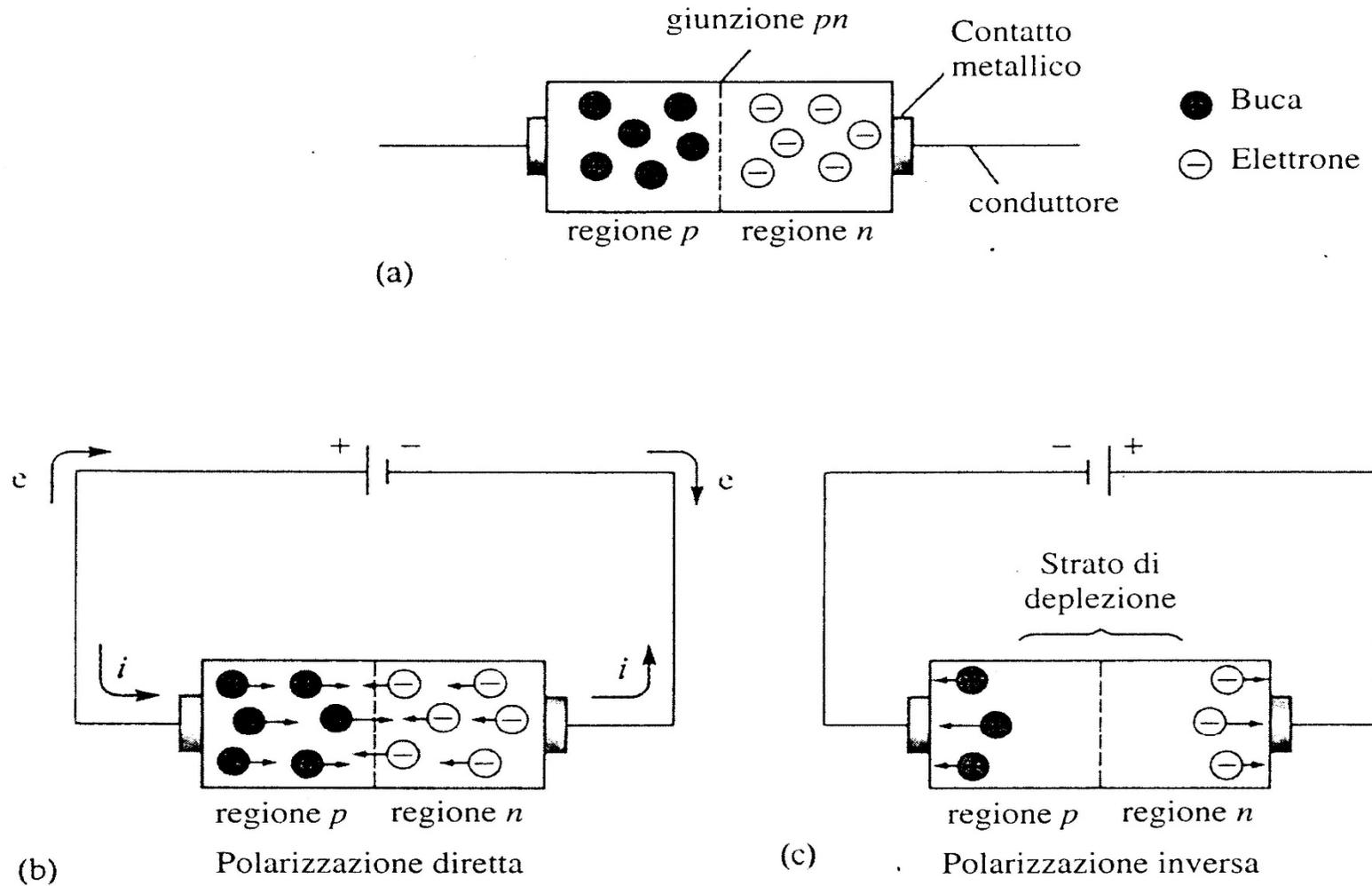
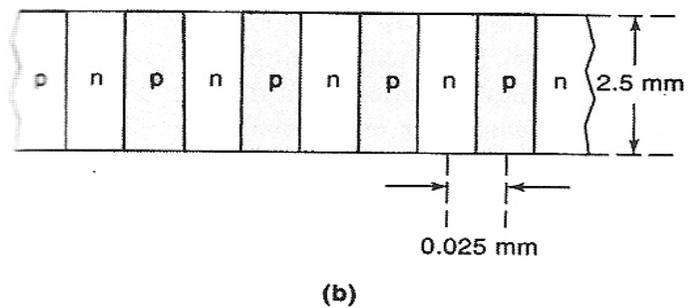
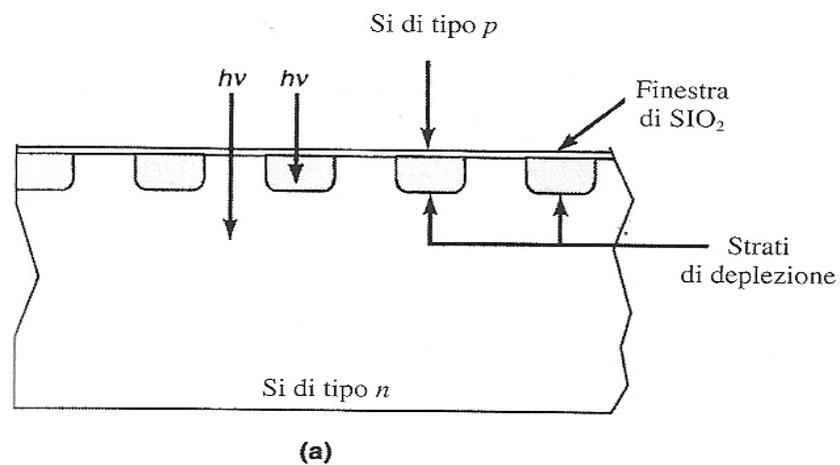


Figura 20-16

(a) Schema di un diodo al silicio. (b) Flusso di elettricità in condizioni di polarizzazione diretta. (c) Formazione dello strato di deplezione, che impedisce il flusso di elettricità, in condizioni di polarizzazione inversa.

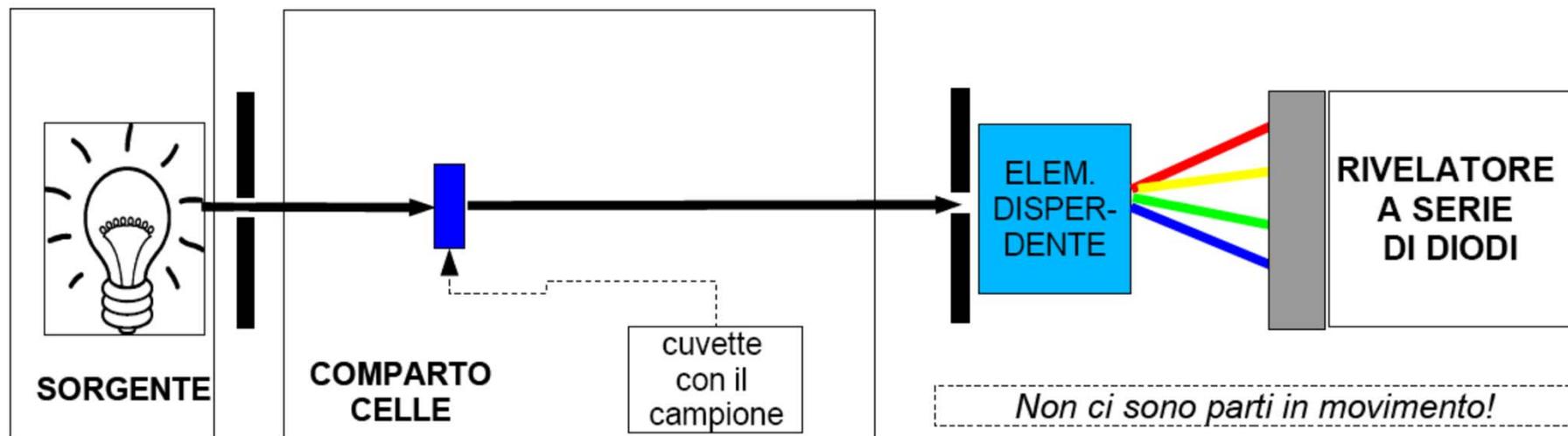
RIVELATORE A SERIE DI DIODI (DAD)

22A Strumenti per misure di assorbimento



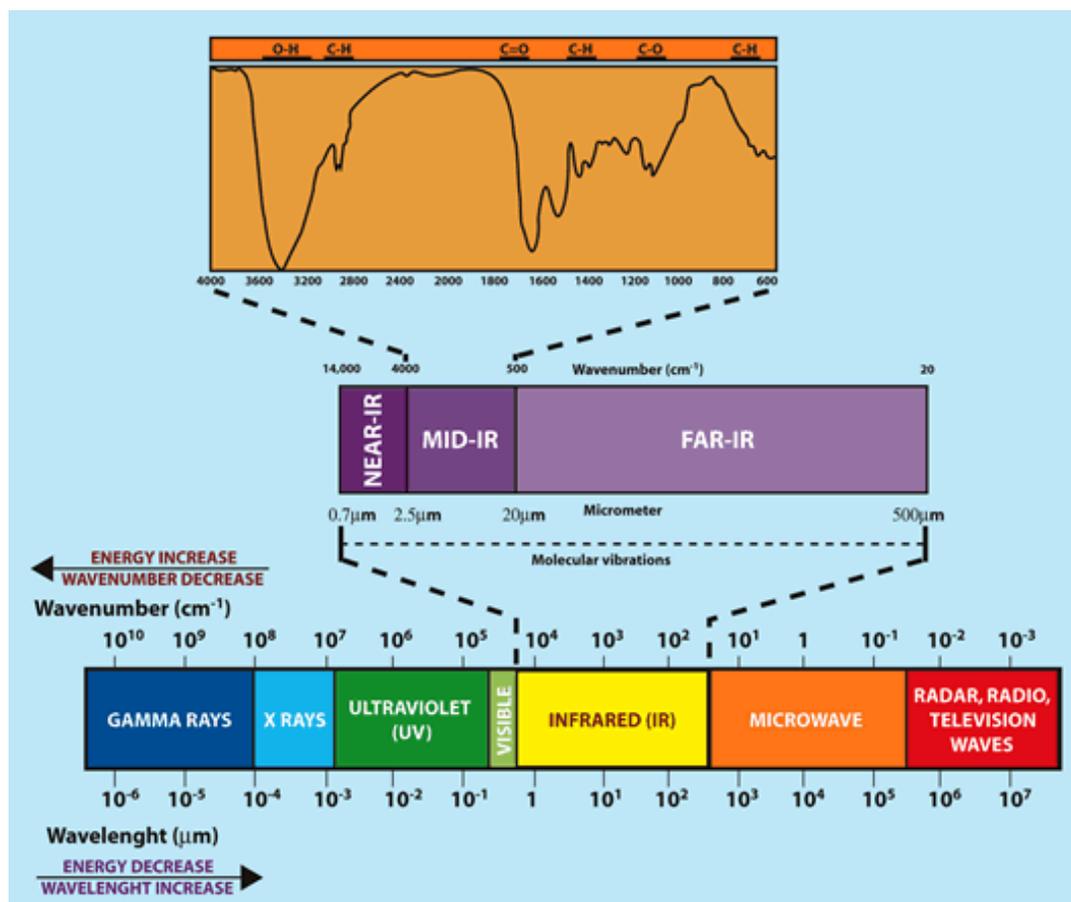
RIVELATORE A SERIE DI DIODI (DAD)

E' possibile monitorare simultaneamente diverse λ



Vengono utilizzati prevalentemente come rivelatori HPLC

SPETTROSCOPIA IR



La radiazione infrarossa si riferisce a quella parte dello spettro elettromagnetico che si trova tra le regioni del visibile e delle microonde.

Dividiamo questa zona in:

→ IR vicino (NIR) → 13.000–4.000 cm^{-1}

→ IR medio (MIR) → 4.000–200 cm^{-1}

→ IR lontano (FIR) → 200 – 10 cm^{-1}

La zona che comunque interessa maggiormente è quella compresa fra 4.000 e 400 cm^{-1} .

MOTI VIBRAZIONALI

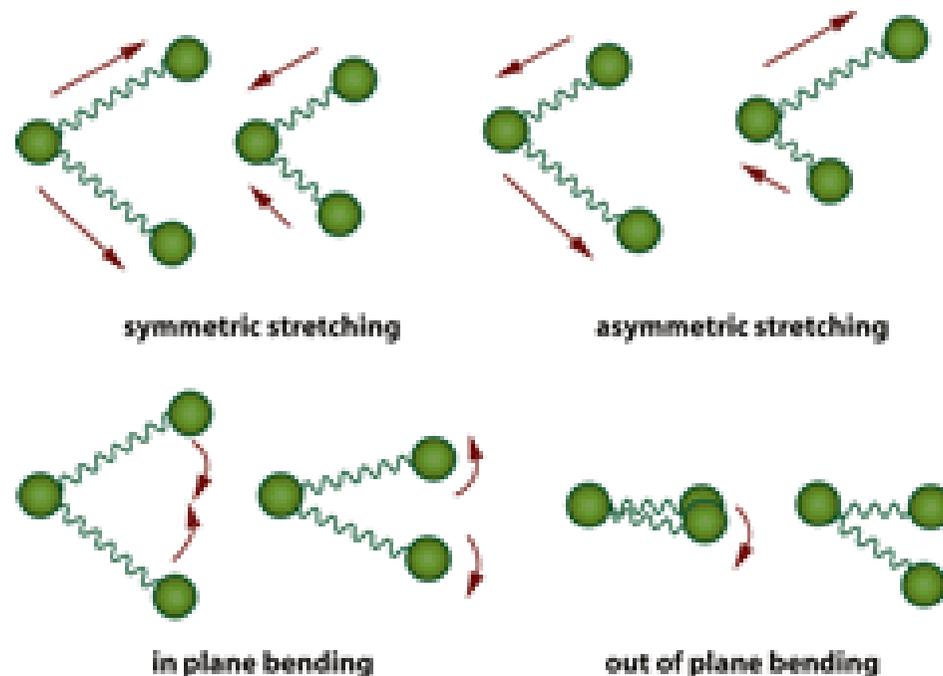
IR è una **spettroscopia vibrazionale**, infatti quando una molecola viene investita da una radiazione infrarossa la cui frequenza (espressa in termini di numeri d'onda, inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda) sia compresa fra 10.000 e 100 cm^{-1}

L'energia ceduta dalla radiazione stessa viene convertita in energia vibrazionale, e sono due i modi fondamentali in cui la molecola può vibrare:

VIBRAZIONE DI STRETCHING (stiramento):
dovuto a stiramento ritmico lungo l'asse di legame

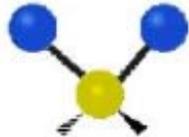
VIBRAZIONE DI BENDING (piegamento)
dovuto a variazione dell'angolo di legame

- vibrazioni sul piano → scissoring e rocking
- vibrazioni fuori dal piano → wagging e twisting

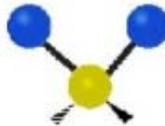


MOTI VIBRAZIONALI

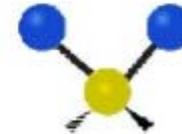
Stretching Asimmetrico (stiramento)



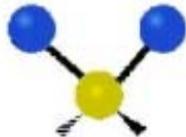
Bending Asimmetrico nel piano: Scissoring (forbice)



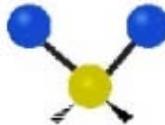
Bending Asimmetrico fuori del piano:
Twisting (torsione)



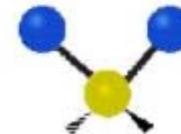
Stretching Simmetrico

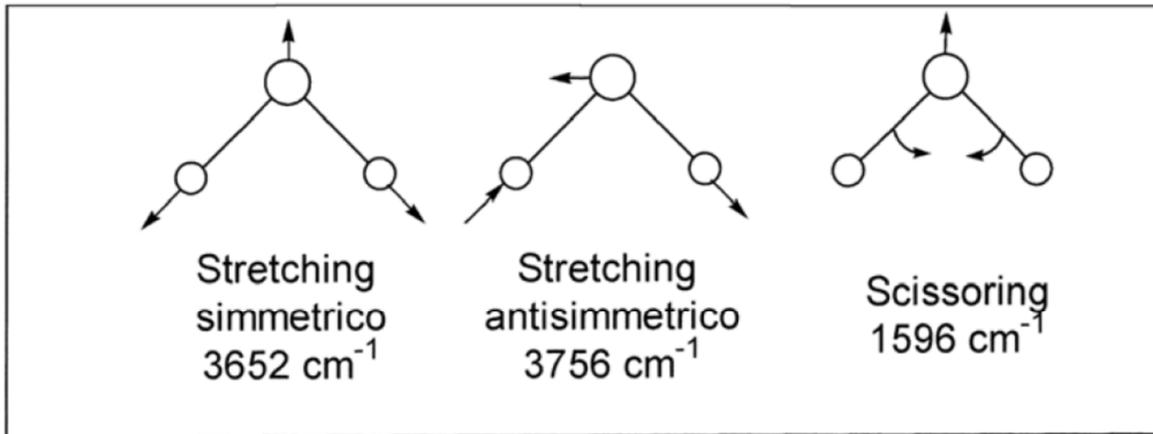


Bending Simmetrico nel piano: Rocking (dondolo)

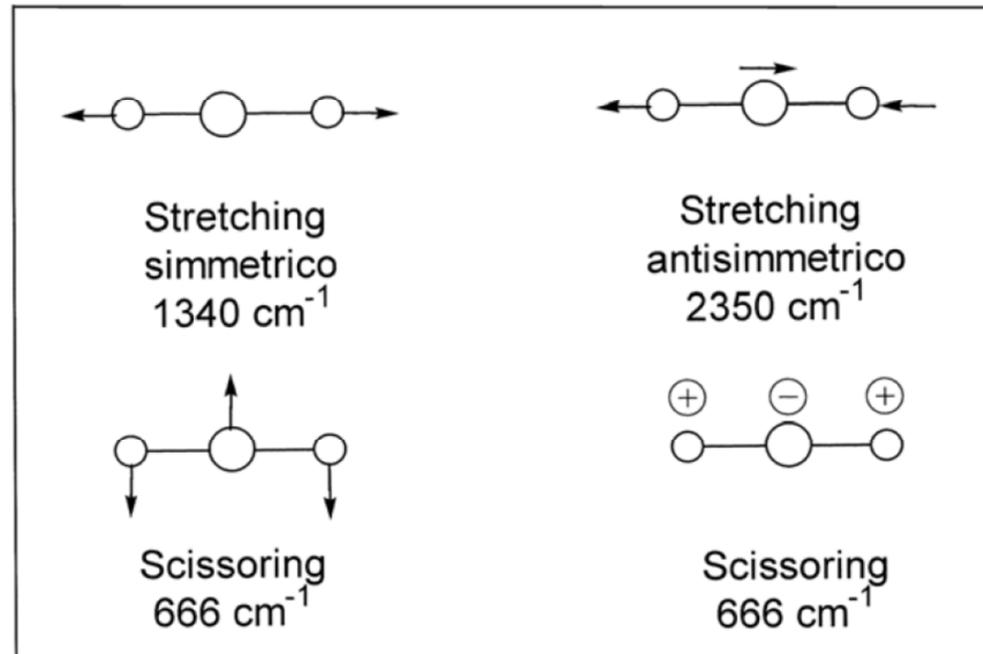


Bending Simmetrico fuori del piano:
Wagging (agitare)





H₂O



CO₂

FATTORI CHE INFLUENZANO LA FREQUENZA DI ASSORBIMENTO

ASSOCIAZIONE MOLECOLARE

Le molecole all'interno di un campione possono instaurare dei legami fra di loro, in particolare legami idrogeno, sia intermolecolari (come accade nel caso degli acidi carbossilici), sia intramolecolari.

Il legame idrogeno modifica la costante di forza di entrambi i gruppi, perciò vengono alterate le frequenze di vibrazione sia dello stretching che del bending; si osserva un generale spostamento delle frequenze verso valori più bassi.

EFFETTO INDUTTIVO

La frequenza di assorbimento di un gruppo funzionale dipende soprattutto dall'intorno che si trova da affrontare; la presenza dunque di gruppi elettron-donatori o elettron-attrattori la influenza notevolmente!

GRUPPI ELETTRONATTRATTORI → spostano gli assorbimenti dei gruppi vicini a frequenze maggiori

GRUPPI ELETTRONDONATORI → spostano gli assorbimenti a frequenze maggiori

CONIUGAZIONE

Produce una delocalizzazione degli elettroni π , riducendo il carattere di doppio legame, e quindi spostando le frequenze a valori più bassi di circa $10 - 15 \text{ cm}^{-1}$

MOTI VIBRAZIONALI

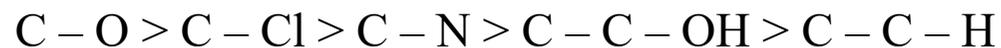
Quando queste vibrazioni determinano una variazione del momento dipolare della molecola, allora si ha una vibrazione IR attiva.

Quando si ha una tale variazione, infatti, la molecola, vibrando, produce un campo elettrico oscillante: ciò rende possibile lo scambio di energia con le onde elettromagnetiche.

$$\mu = q \cdot d$$

μ = momento dipolare
 q = carica elettrica
 d = distanza vettoriale

L'intensità di una banda dipende dal valore del momento dipolare del legame a cui si riferisce:



Quindi l'intensità di una banda dipende dall'elettronegatività relativa degli atomi coinvolti nel legame a cui quella banda si riferisce

SPETTRO IR

Lo spettro IR, che riporta l'intensità dell'assorbimento in funzione della lunghezza d'onda, è caratterizzato da picchi riferibili a gruppi funzionali specifici, che fanno parte della struttura della molecola in esame.

Grazie alla riproducibilità di questi picchi, e soprattutto dei valori caratteristici di assorbimento, siamo in grado di risalire alla struttura della molecola in esame.

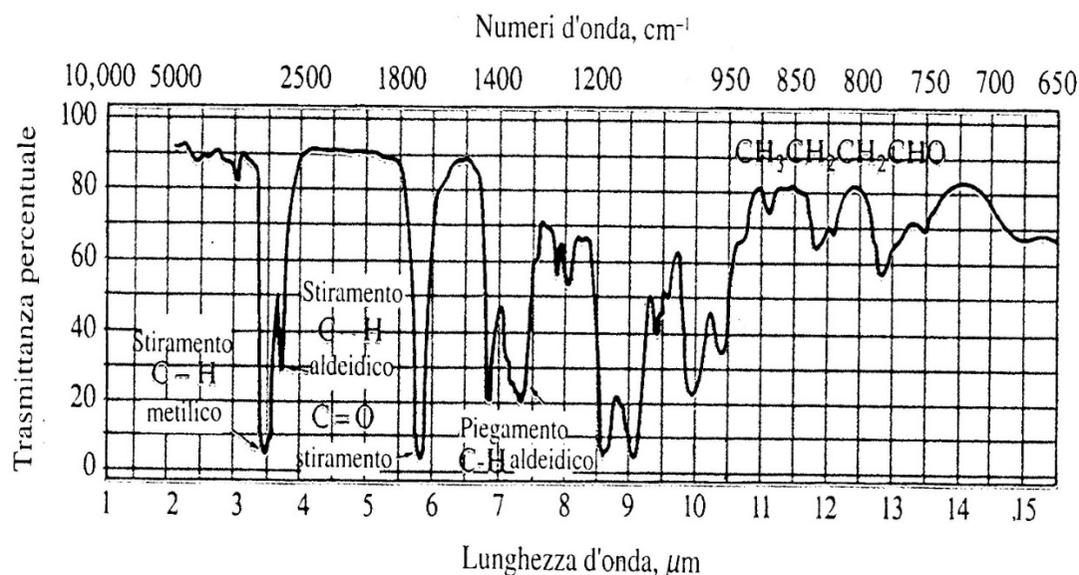


Figura 21-15

Spettro infrarosso per l'*n*-butanale (*n*-butirraldeide). Notare che si riporta in grafico la trasmittanza più che l'assorbanza.

Lo spettro è meno risolto a λ maggiori (ΔE tra i livelli energetici è minore)

LO SPETTRO IR

Lo spettro infrarosso si presenta come una sequenza di bande di assorbimento registrate in funzione della lunghezza d'onda (o del numero d'onda).

Nel caso di composti in fase gassosa le bande appaiono di solito alquanto complesse in quanto prodotte da transizioni vibro-rotazionali delle molecole.

In fase solida e praticamente neanche in liquida le molecole si urtano prima di aver compiuto una rotazione completa (in altre parole il loro cammino libero medio è inferiore al tempo di rotazione), per questo gli spettri si presentano più semplici.

I parametri che caratterizzano una banda di assorbimento IR sono:

POSIZIONE

La posizione di una banda viene indicata con la sua λ_{\max} (in micrometri μm) o più spesso in numero d'onda ν (cm^{-1}), che dipende dalla costante di forza del legame interessato: più rigido è il legame, quanto maggiore è l'energia necessaria per amplificare le vibrazioni.

INTENSITÀ

L'intensità di una banda (cioè l'altezza del picco) esprime la probabilità che avvenga la transizione energetica dallo stato fondamentale a quello eccitato (da parte del gruppo funzionale) che provoca l'assorbimento.

Lo spettro è meno risolto a λ maggiori (DE tra i livelli energetici è minore)

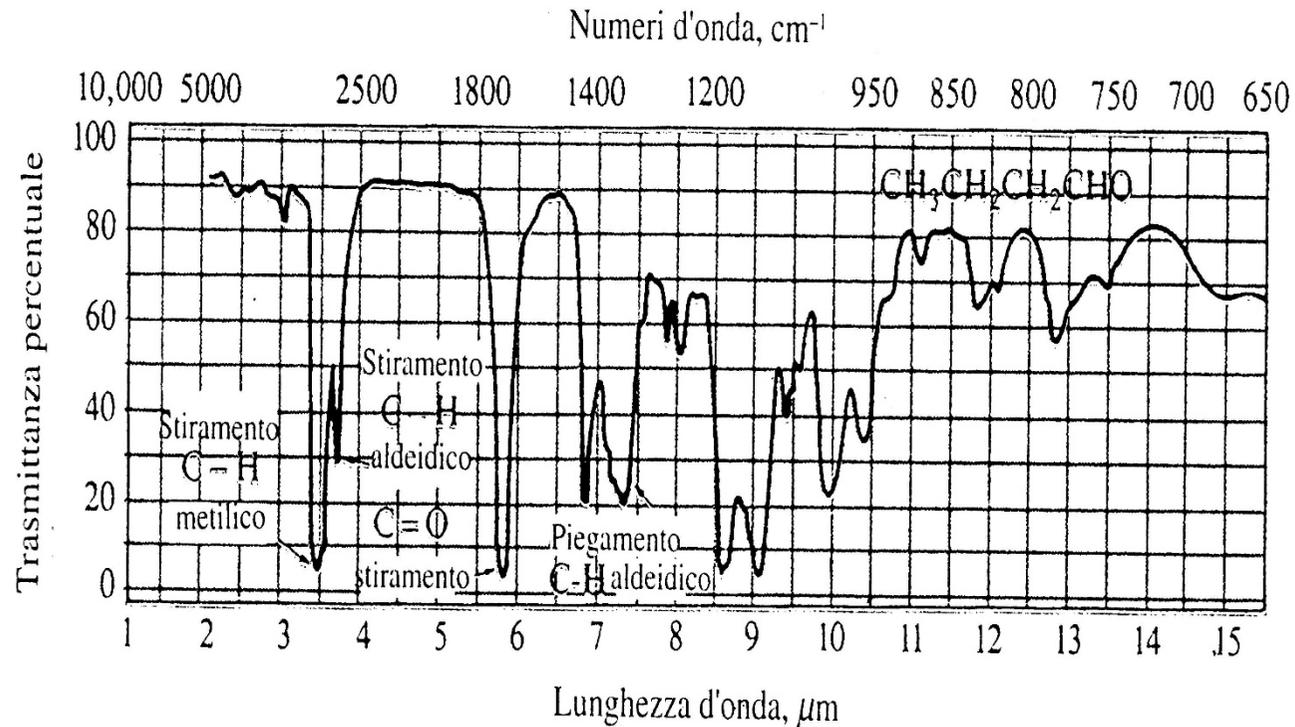


Figura 21-15

Spettro infrarosso per l'*n*-butanale (*n*-butirraldeide). Notare che si riporta in grafico la trasmittanza più che l'assorbanza.

Lo spettro può essere diviso in 4 zone:

- Zona di stretching dell'idrogeno ($l = 2.7 - 4.0$ mm)
- Zona di stretching del triplo legame ($l = 4.0 - 5.0$ mm)
- Zona di stretching del doppio legame ($l = 5.0 - 6.4$ mm)
- Zona di stretching e bending del legame singolo ($l = 6.0 - 15$ mm)

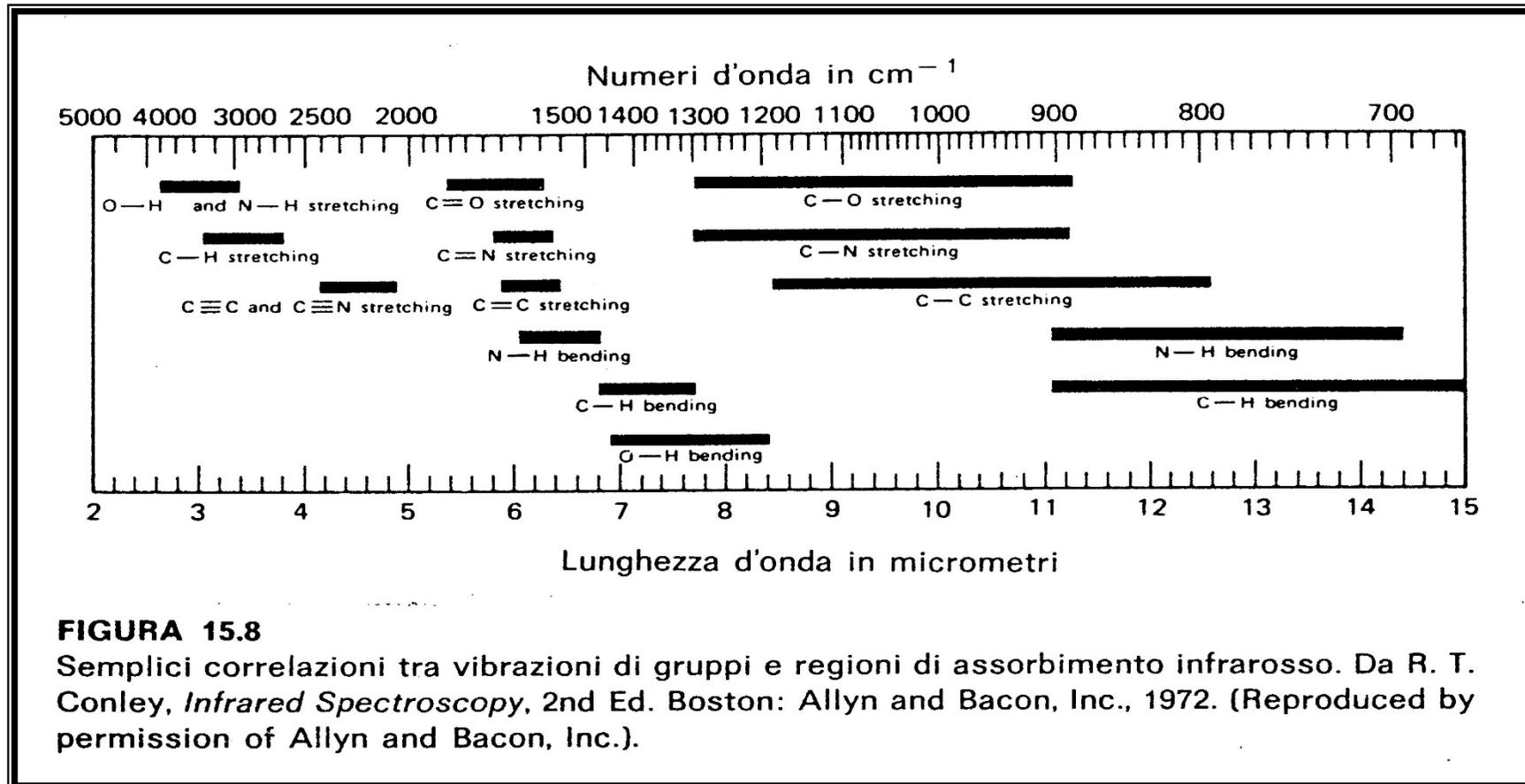


FIGURA 15.8

Semplici correlazioni tra vibrazioni di gruppi e regioni di assorbimento infrarosso. Da R. T. Conley, *Infrared Spectroscopy*, 2nd Ed. Boston: Allyn and Bacon, Inc., 1972. (Reproduced by permission of Allyn and Bacon, Inc.).

La strumentazione è paragonabile a quella di uno spettrofotometro con l'uso di materiali che non provochino interferenze (p.es. cuvette di KBr). La sorgente è generalmente un solido riscaldato e in alcuni strumenti si usano rivelatori di calore (p.es. termocoppie) soprattutto utili nella regione a lunghezze d'onda elevate.

Alcuni strumenti più moderni (FTIR, spettrometro infrarosso a trasformata di Fourier) sono in grado di misurare contemporaneamente tutto lo spettro IR.

La spettroscopia IR viene utilizzata molto spesso a scopo qualitativo. E' uno strumento molto potente perché lo spettro IR della regione *fingerprint* (impronta digitale) a basse energie è praticamente unico per ogni molecola. Per l'identificazione della molecola si confronta lo spettro ottenuto con quello di molti altri spettri disponibili in banche dati. Lo spettro deve essere registrato in opportune condizioni sperimentali (con la sostanza gassosa, solida o disciolta in un solvente che non interferisce).

VANTAGGI

- fornisce per ciascun composto esaminato una complessa e caratteristica impronta digitale
- avendo a disposizione uno standard del composto, un controllo computerizzato dello strumento IR permette la perfetta sovrapposizione delle impronte digitali

LIMITI

- usata raramente nella tecnica quantitativa a causa della difficoltà nella preparazione del campione e della complessità dello spettro
- identifica solo concentrazioni elevate (bassa sensibilità)
- la preparazione del campione richiede un certo grado di abilità (pasticche di KBr)
- la manipolazione del campione può avere effetto sullo spettro e rendere la tecnica non del tutto riproducibile

STRUMENTAZIONE

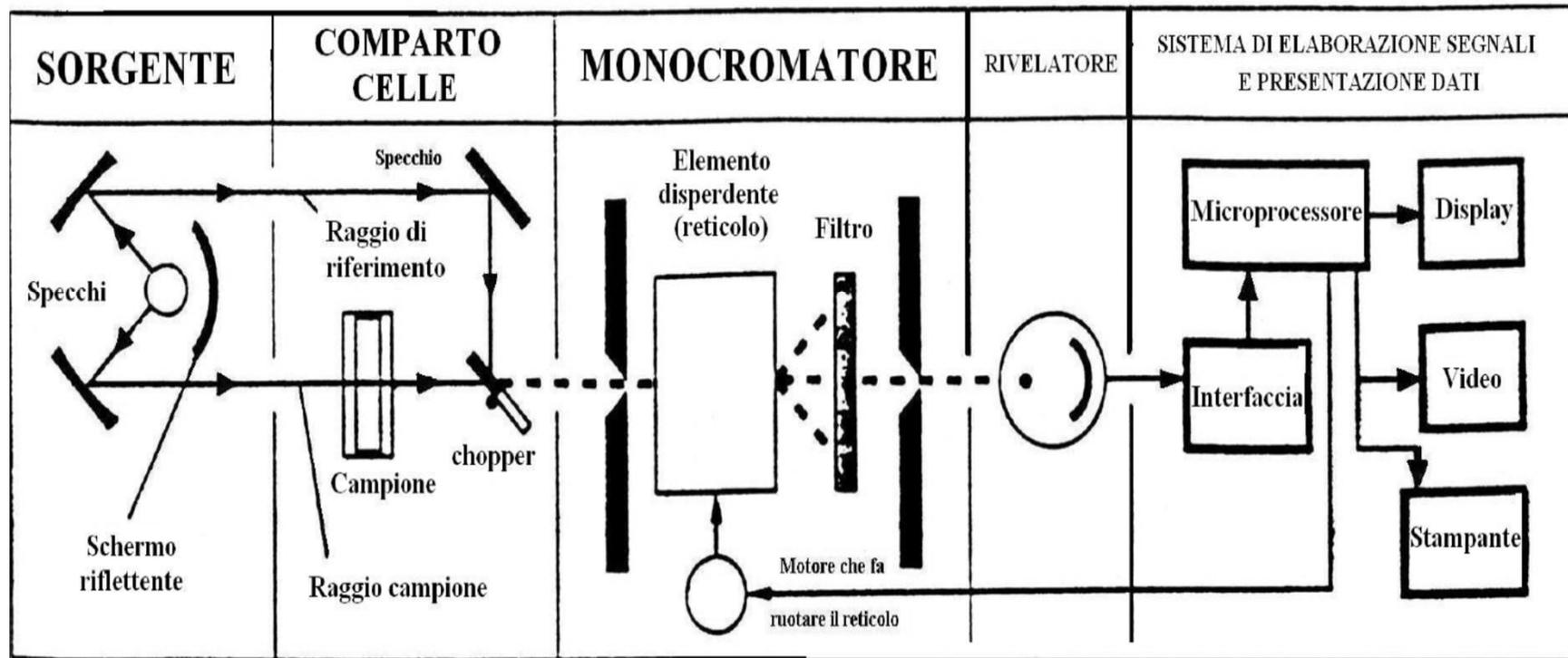
I dispositivi strumentali oggi a nostra disposizione per ottenere spettri nel medio e lontano IR (lo studio e le applicazioni del vicino infrarosso sono relativamente recenti) sono sostanzialmente di due tipi:

- SPETTROFOTOMETRI A DISPERSIONE
- SPETTROFOTOMETRI A INTERFERENZA

I primi sono più diffusi nei moderni laboratori, soprattutto per motivi di costo; i secondi offrono invece prestazioni senz'altro superiori ma i costi sono decisamente più elevati.

L'intervallo di lunghezze d'onda coperto dagli strumento è generalmente compreso tra **4000 e 625 cm^{-1}** , corrispondente al *medio IR*, ma sono anche molto diffusi quelli con intervallo spettrale esteso verso λ più elevate, fino a **400 e 200 cm^{-1}** , che include anche il *lontano IR*.

SPETTROFOTOMETRIA A DISPERSIONE



SPETTROFOTOMETRIA IN TRASFORMATATA DI FOURIER (FT-IR)

Questa tecnica strumentale è basata sulla spettroscopia infrarossa classica. Si tratta di una tecnica recente creata grazie alla computerizzazione del laboratorio strumentale.

Il suo principio di base è rappresentato dalla possibilità di cogliere contemporaneamente tutte le frequenze dello spettro IR nel rilevatore, il che rende superflua la scansione della lunghezza d'onda.

Questo è possibile trasformando, per mezzo di un *interferometro*, la radiazione IR policromatica emessa dalla sorgente (istante per istante con la medesima intensità) in un *interferogramma*, dove l'assorbimento non è più funzione della frequenza, ma del tempo (cioè *si passa da dominio delle frequenze a dominio dei tempi*).

SPETTROSCOPIA DI EMISSIONE

FLUORESCENZA

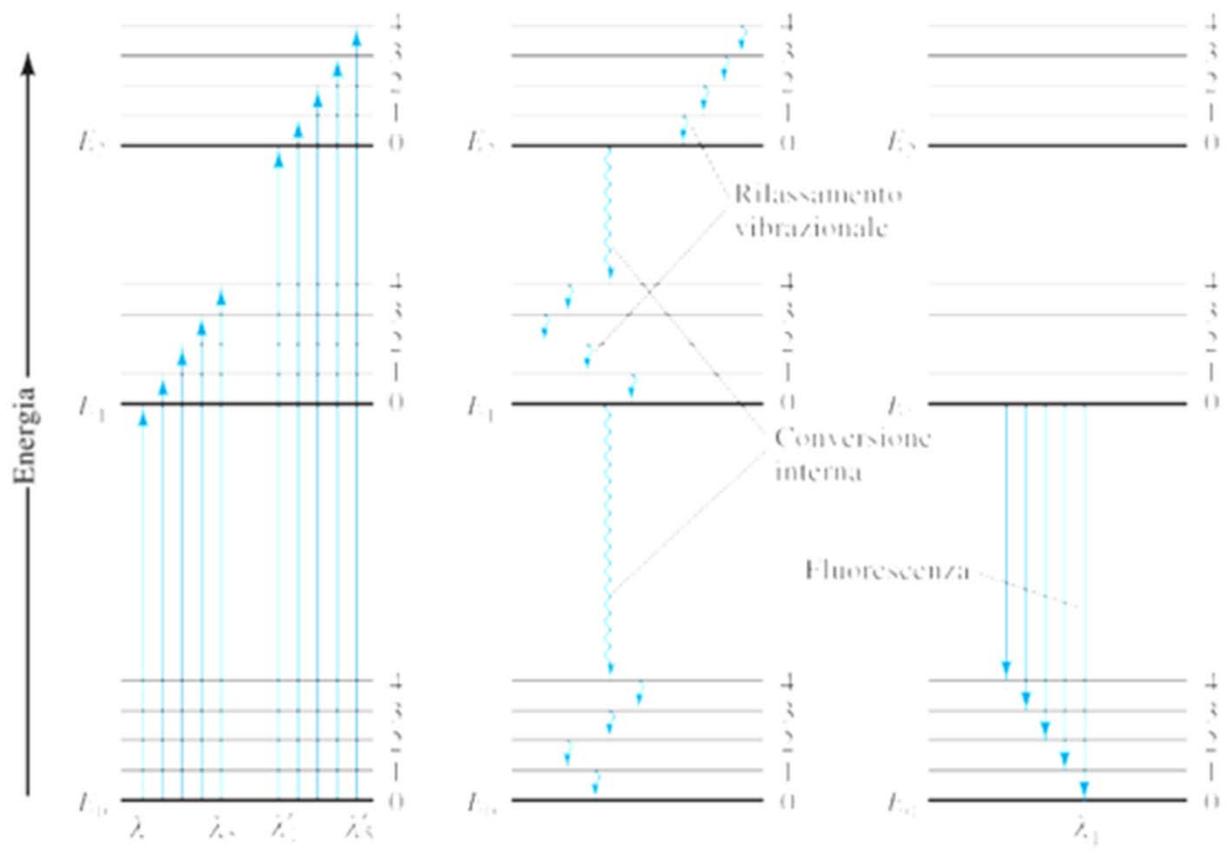
LUMINESCENZA

E' necessario che una sorgente esterna fornisca al sistema una quantità di energia sufficiente ad innescare l'emissione luminosa. Differenti tipi di sorgente energetica definiscono, pertanto, differenti tipi di luminescenza.

Si può così parlare, ad esempio, di elettroluminescenza, radioluminescenza, chemiluminescenza e fotoluminescenza.

In quest'ultima forma di luminescenza l'energia è fornita dall'assorbimento di radiazione elettromagnetica nello spettro compreso fra l'ultravioletto e l'infrarosso; la cosiddetta regione del visibile.

Nella fotoluminescenza vengono, infine, distinti due diversi processi: **fluorescenza e fosforescenza**. La fluorescenza è il risultato di un processo fisico in tre stadi successivi, che avviene in certe molecole (generalmente idrocarburi policiclici o eterociclici), chiamati per questo motivo fluorofori o fluorocromi.



(a) Assorbimento molecolare (b) Rilassamento non radiativo (c) Fluorescenza

Diagramma dei livelli energetici che mostra alcuni dei processi che avvengono durante (a) l'assorbimento della radiazione incidente (b) il rilassamento non radiativo, e (c) fluorescenza da parte di una specie molecolare. L'assorbimento avviene di solito in 10^{-15} s, mentre il rilassamento vibrazionale dai 10^{-11} ai 10^{-10} s. Anche la conversione interna tra i diversi stati elettronici è molto rapida (10^{-12} s), mentre la vita media della fluorescenza varia tipicamente dai 10^{-10} ai 10^{-5} s.

MECCANISMO FLUORESCENZA

La fluorescenza è uno dei numerosi meccanismi mediante cui una molecola può tornare allo stato fondamentale dopo essere stata eccitata mediante assorbimento di radiazione.

Le molecole potenzialmente possono fluorescere → cammini non radiativi con rilassamento a velocità maggiore dell'emissione fluorescente.

Rendimento quantico → rapporto del numero di molecole che fluoresce rispetto al numero totale di molecole eccitate

Molecole altamente fluorescenti, come la fluoresceina, hanno efficienze quantiche che, in alcune condizioni, si avvicinano all'unità. Le specie non fluorescenti hanno efficienze che sono essenzialmente zero

La fluorescenza è particolarmente favorita in molecole rigide.

La rigidità abbassa la velocità di rilassamento non radiativo al punto in cui il rilassamento per fluorescenza ha tempo sufficiente per avvenire

CONCENTRAZIONE vs INTENSITÀ FLUORESCENZA

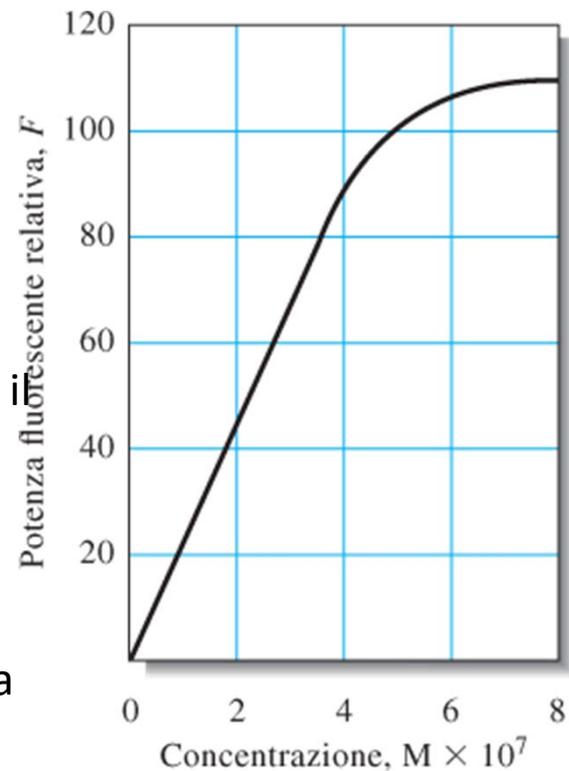
La potenza della radiazione fluorescente F è proporzionale alla potenza radiante del fascio di eccitazione assorbito dal sistema:

$$F = K'(P_0 - P)$$

Da cui si può scrivere:

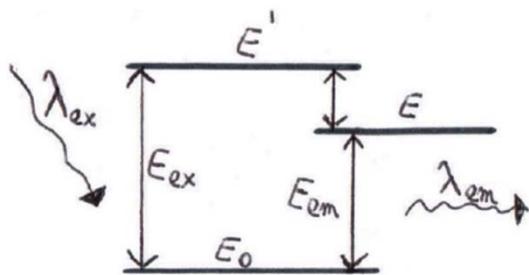
$$F = kc$$

Per c grande la relazione diventa non lineare per effetto dell' **assorbimento primario** in cui il fascio incidente viene assorbito così fortemente che la fluorescenza non è più proporzionale alla concentrazione. Se c molto alta, F inizia a diminuire per **assorbimento secondario** (assorbimento della radiazione emessa da altre molecole)

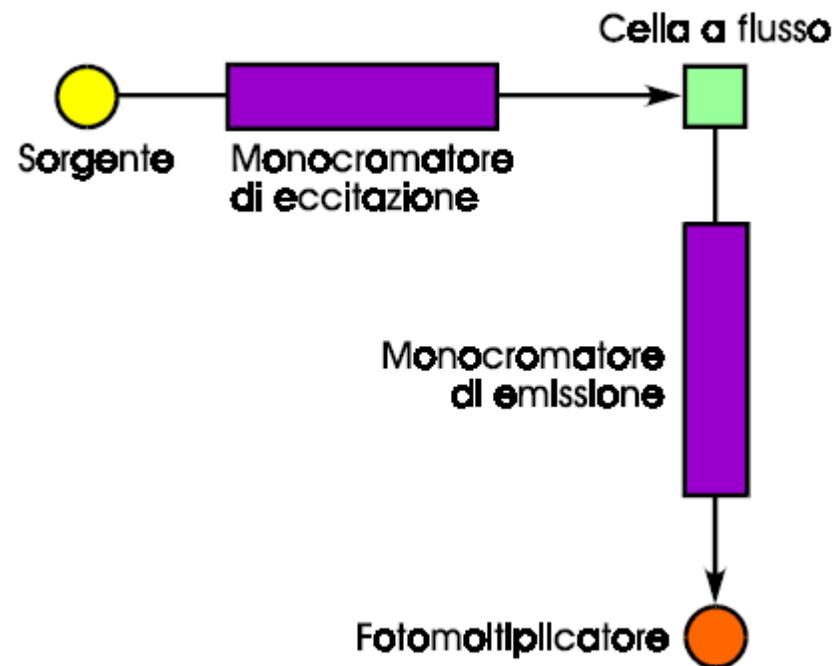
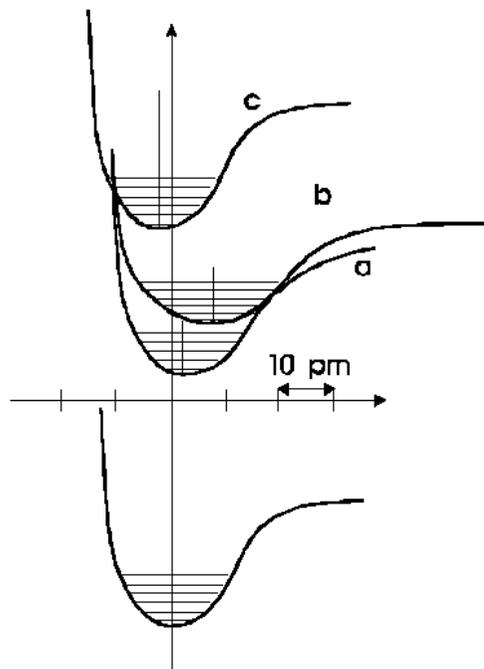


SPETTROSCOPIA DI EMISSIONE

Fluorescenza



λ di emissione $>$ λ di eccitazione



STRUMENTI DI FLUORESCENZA

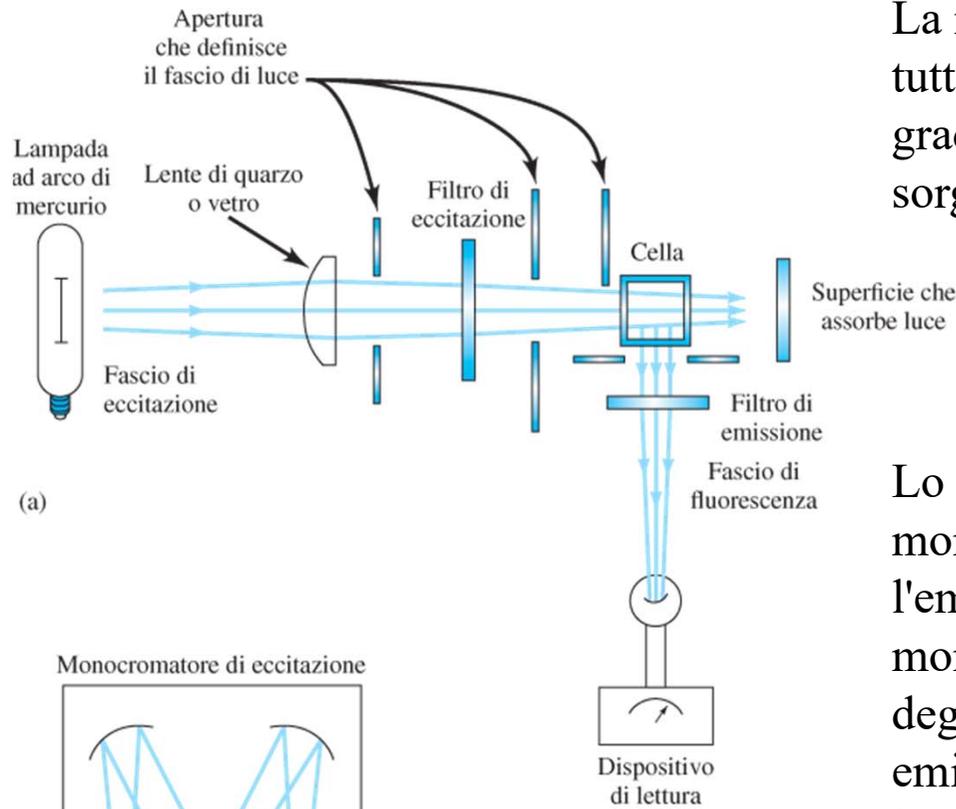
I metodi di fluorescenza sono generalmente da uno a tre ordini di grandezza più sensibili dei metodi basati sull'assorbimento.

Le sorgenti tipiche della fluorescenza sono le lampade ad arco di mercurio, ad arco di xeno, ad arco di xenomercurio e i laser.

I monocromatori e i trasduttori sono di solito simili a quelli utilizzati negli spettrofotometri ad assorbimento.

I fotomoltiplicatori vengono ampiamente utilizzati negli spettrofluorimetri ad elevata sensibilità ma i detector a serie di diodi sono diventati molto popolari negli ultimi anni.

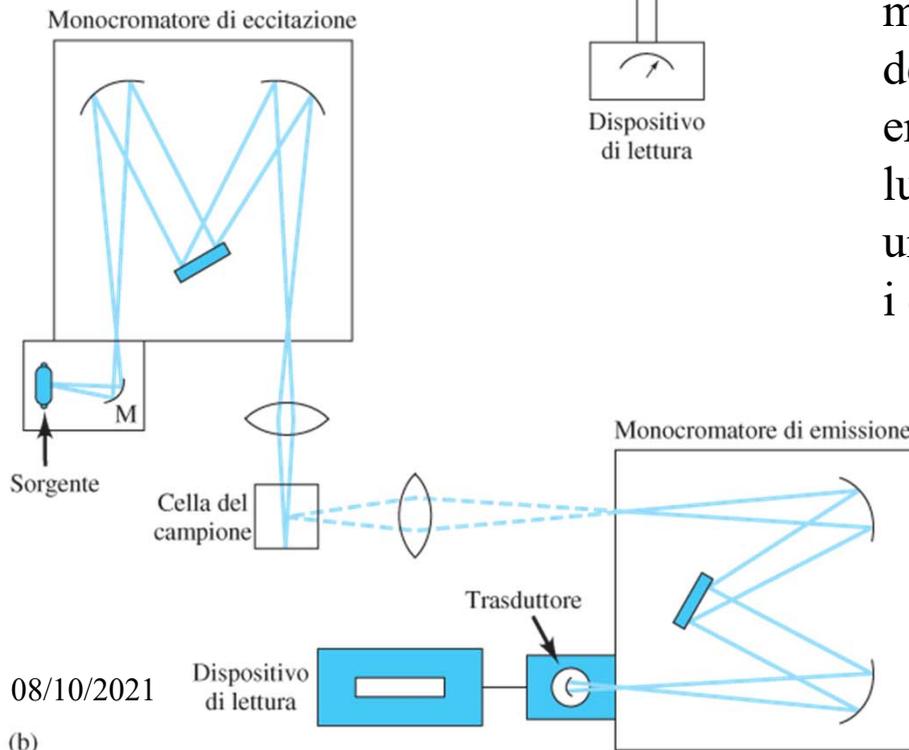
I fluorimetri e gli spettrofluorimetri differiscono ampiamente in sofisticazione, prestazioni e costo, così come gli spettrofotometri di assorbimento.



La radiazione fluorescente viene emessa in tutte le direzioni e la configurazione a 90 gradi fa sì che il rivelatore non veda la sorgente.

(a)

Lo spettrofluorimetro (b) usa due monocromatori a reticolo ed analizza l'emissione ad angoli retti. I due monocromatori permettono la scansione degli spettri di eccitazione e degli spettri di emissione o entrambi gli spettri (entrambe le lunghezze d'onda vengono scansionate con un determinato offset di lunghezza d'onda tra i due monocromatori).



(b)