

Comprende versione  
ebook



Marco Grotti

# Metodi spettroscopici per l'analisi elementare





# Accedi ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse  
un libro che **non pesa**  
e si **adatta** alle dimensioni  
del **tuo lettore!**



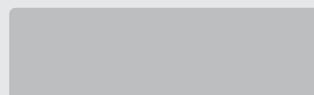
▼  
**COLLEGATI AL SITO  
EDISESUNIVERSITA.IT**

▼  
**ACCESSI AL  
MATERIALE DIDATTICO**

▼  
**SEGUICI LE  
ISTRUZIONI**

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it**  
e accedere ai contenuti digitali.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie



Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.  
L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito **per 18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edisesuniversita.it** e segui queste semplici istruzioni

▼  
**Se sei registrato al sito**

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

▼  
**Se non sei già registrato al sito**

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito o autenticali tramite facebook
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edisesuniversita.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



I contenuti digitali sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere all'**Ebook**, ovvero la versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita Bookshelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**.

# Metodi spettroscopici per l'analisi elementare

Marco Grotti

Università degli Studi di Genova



Marco Grotti

**Metodi spettroscopici per l'analisi elementare**

Copyright © 2022, EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0  
2026 2025 2024 2023 2022

*Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata*

*A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.*

*L'Editore*

*L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli eventuali aventi diritto.*

*Stampato presso PrintSprint S.r.l. – Napoli*

*per conto della EdiSES Edizioni S.r.l. – Piazza Dante Alighieri, 89 – Napoli*

[www.edises.it](http://www.edises.it)  
[assistenza.edises.it](mailto:assistenza.edises.it)

ISBN 978 88 3623 110 2

---

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa.

Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma [assistenza.edises.it](http://assistenza.edises.it)

*Alla mia famiglia*



Non si può fare a meno di essere in soggezione quando si contemplano i misteri dell'eternità, della vita e della meravigliosa struttura della realtà. È sufficiente cercare di comprendere un po' di mistero ogni giorno. La cosa importante è non smettere mai di fare domande.

Albert Einstein



# Sommario

*Prefazione*

*Introduzione*

Capitolo I

*Teoria della spettroscopia atomica*

Capitolo II

*Spettrometria di emissione atomica*

Capitolo III

*Spettrometria di assorbimento atomico*

Capitolo IV

*Spettrometria di fluorescenza atomica*

Capitolo V

*Spettrometria di massa atomica*

Capitolo VI

*Spettrometria atomica a raggi X*

Capitolo VII

*Spettroscopia elettronica*

*Appendici*

*Bibliografia*

*Fonti delle illustrazioni*



# Indice dei contenuti

<i>Prefazione</i>	17
<i>Introduzione</i>	19
<b>1 Teoria della spettroscopia atomica</b>	23
1.1 La radiazione elettromagnetica	23
1.2 Spettri atomici di emissione e di assorbimento	27
1.3 Interpretazione degli spettri atomici	29
1.4 Probabilità di transizione e intensità delle righe spettrali	42
1.5 Legge di Maxwell–Boltzmann	47
1.6 Effetto Zeeman	49
1.7 Ampiezza delle righe spettrali	52
1.7.1 Allargamento naturale	53
1.7.2 Allargamento per effetto Doppler	53
1.7.3 Allargamento per pressione	54
1.8 Proprietà fondamentali di un plasma	56
<b>2 Spettrometria di emissione atomica</b>	63
2.1 Introduzione	63
2.2 Spettrometria di emissione atomica con sorgente a fiamma	64
2.3 Spettrometria di emissione atomica con sorgente ad arco o scintilla	64
2.4 Spettrometria di emissione atomica con sorgente a plasma	66
2.4.1 Strumentazione	66
2.4.1.1 Sistema d'introduzione del campione	67
2.4.1.1.1 Nebulizzazione pneumatica	67
2.4.1.1.2 Nebulizzazione ad ultrasuoni	76
2.4.1.1.3 Generazione di idruri	79
2.4.1.1.4 Vaporizzazione elettrotermica	81
2.4.1.1.5 Tecniche cromatografiche	84
2.4.1.1.6 Ablazione mediante scarica elettrica	84
2.4.1.1.7 Ablazione laser	85

2.4.1.2	Sorgente a plasma	87
2.4.1.2.1	Plasma accoppiato induttivamente	87
2.4.1.2.2	Plasma in corrente continua	94
2.4.1.2.3	Plasma indotto da microonde	95
2.4.1.3	Sistema ottico	97
2.4.1.3.1	Ottica di trasferimento	97
2.4.1.3.2	Ottica di selezione	98
2.4.1.3.3	Prestazioni di un selettori di lunghezze d'onda	104
2.4.1.4	Rivelatore	108
2.4.2	Interferenze	111
2.4.2.1	Interferenze spettrali	112
2.4.2.2	Interferenze fisiche	118
2.4.2.3	Interferenze chimiche	120
2.4.3	Prestazioni analitiche e applicazioni	121
2.4.3.1	Applicabilità	122
2.4.3.2	Sensibilità e limiti di rilevabilità	122
2.4.3.3	Precisione	124
2.4.3.4	Accuratezza	124
2.4.3.5	Linearità	124
2.4.3.6	Confronto con le altre tecniche di spettrometria atomica	125
2.4.3.7	Applicazioni	125
2.5	Spettrometria di emissione atomica con sorgente a scarica a bagliore	127
2.6	Spettrometria a plasma indotto da laser	130
3	<i>Spettrometria di assorbimento atomico</i>	133
3.1	Introduzione	133
3.2	Strumentazione	134
3.2.1	Sorgente	135
3.2.2	Sistema di atomizzazione	142
3.2.2.1	Atomizzazione in fiamma	142
3.2.2.2	Atomizzazione eletrotermica	146
3.2.2.3	Generazione chimica di vapori	154
3.2.3	Sistema d'introduzione del campione	159
3.2.4	Sistema di correzione del fondo	160
3.2.4.1	Metodo della sorgente continua	161
3.2.4.2	Metodi basati sull'effetto Zeeman	162
3.2.5	Sistema ottico	169
3.2.6	Rivelatore	169
3.3	Interferenze	170
3.3.1	Interferenze spettrali	170
3.3.2	Interferenze fisiche	172
3.3.3	Interferenze chimiche	172
3.3.3.1	Interferenze chimiche nella FAAS	173
3.3.3.2	Interferenze chimiche nella ETAAS	174
3.3.3.3	Interferenze chimiche nella HG-AAS e CV-AAS	176

3.4 Prestazioni analitiche e applicazioni	178
3.4.1 Applicabilità	179
3.4.2 Sensibilità e limiti di rilevabilità	179
3.4.3 Precisione	180
3.4.4 Accuratezza	181
3.4.5 Linearità	181
3.4.6 Confronto con le altre tecniche di spettrometria atomica	181
3.4.7 Applicazioni	182
<b>4 Spettrometria di fluorescenza atomica</b>	<b>185</b>
4.1 Introduzione	185
4.2 Teoria	185
4.2.1 Transizioni di fluorescenza atomica	186
4.2.2 Intensità della radiazione di fluorescenza	187
4.2.3 Saturazione ottica	188
4.2.4 Autoassorbimento	189
4.3 Strumentazione	189
4.3.1 Sorgente	191
4.3.2 Atomizzatore	192
4.4 Interferenze	193
4.5 Prestazioni analitiche e applicazioni	193
<b>5 Spettrometria di massa atomica</b>	<b>197</b>
5.1 Introduzione	197
5.2 Spettrometria di massa con sorgente a plasma accoppiato induttivamente	198
5.2.1 Strumentazione	198
5.2.1.1 Sistema d'introduzione del campione	198
5.2.1.1.1 Nebulizzazione pneumatica	199
5.2.1.1.2 Nebulizzazione ad ultrasuoni	200
5.2.1.1.3 Generazione chimica di vapori	200
5.2.1.1.4 Analisi ad iniezione di flusso	201
5.2.1.1.5 Vaporizzazione elettrotermica	203
5.2.1.1.6 Tecniche cromatografiche	204
5.2.1.1.7 Ablazione laser	207
5.2.1.2 Sorgente a plasma	208
5.2.1.3 Interfaccia	210
5.2.1.4 Ottica ionica	212
5.2.1.5 Analizzatore di massa	215
5.2.1.5.1 Prestazioni di un analizzatore di massa	215
5.2.1.5.2 Analizzatore a quadrupolo	217
5.2.1.5.3 Settore magnetico a doppia focalizzazione	223
5.2.1.5.4 Analizzatore a tempo di volo	232

5.2.1.5.5	Considerazioni conclusive sull'analizzatore di massa	236
5.2.1.6	Cella di reazione/collisione	237
5.2.1.7	Spettrometria ICP-MS/MS	242
5.2.1.8	Rivelatore	243
5.2.1.8.1	Rivelatori digitali	243
5.2.1.8.2	Rivelatori analogici	244
5.2.1.8.3	Rivelatori a doppio stadio	246
5.2.1.8.4	Parametri di acquisizione del segnale	246
5.2.2	Interferenze	249
5.2.2.1	Interferenze spettrali	249
5.2.2.2	Interferenze non spettrali	255
5.2.3	Prestazioni analitiche e applicazioni	256
5.2.3.1	Applicabilità	256
5.2.3.2	Sensibilità e limiti di rilevabilità	257
5.2.3.3	Precisione	257
5.2.3.4	Accuratezza	259
5.2.3.5	Linearità	259
5.2.3.6	Confronto con le altre tecniche di spettrometria atomica	259
5.2.3.7	Applicazioni	260
5.3	Spettrometria di massa con sorgente a scintilla	261
5.4	Spettrometria di massa con sorgente a scarica a bagliore	263
5.5	Spettrometria di massa a ioni secondari	264
5.5.1	Teoria	264
5.5.2	Strumentazione	270
5.5.2.1	Colonna degli ioni primari	270
5.5.2.2	Sistema di estrazione degli ioni secondari	272
5.5.2.3	Analizzatore di massa	272
5.5.2.4	Rivelatori	273
5.5.3	Interferenze	274
5.5.4	Prestazioni analitiche e applicazioni	275
5.6	Spettrometria di massa con ionizzazione termica	277
6	<i>Spettrometria atomica a raggi X</i>	281
6.1	Introduzione	281
6.2	Fluorescenza di raggi X	281
6.2.1	Teoria	281
6.2.2	Strumentazione	285
6.2.2.1	Sorgente di raggi X	287
6.2.2.2	Selettore di lunghezze d'onda	290
6.2.2.3	Rivelatore	292
6.2.3	Prestazioni analitiche e applicazioni	294
6.3	Analisi mediante microsonda elettronica	295
6.4	Emissione di raggi X indotta da particelle	297

<i>7 Spettroscopia elettronica</i>	299
7.1 Introduzione	299
7.2 Spettroscopia fotoelettronica a raggi X	300
7.2.1 Teoria	300
7.2.2 Strumentazione	303
7.2.2.1 Sorgente	304
7.2.2.2 Portacampione	304
7.2.2.3 Analizzatore	305
7.2.2.4 Rivelatore	306
7.2.3 Prestazioni analitiche e applicazioni	306
7.3 Spettroscopia Auger	307
7.3.1 Teoria	307
7.3.2 Strumentazione	309
7.3.3 Prestazioni analitiche e applicazioni	309
7.4 Visione d'insieme delle tecniche di analisi di superficie	310
<i>Appendici</i>	315
A1 Acronimi	315
A2 Simboli, unità di misura e fattori di conversione	318
A2.1 Grandezze fisiche, unità di misura e simboli	318
A2.2 Costanti fisiche fondamentali	319
A2.3 Fattori di conversione	320
A2.4 Prefissi moltiplicativi	321
A3 Glossario	322
<i>Bibliografia</i>	325
<i>Fonti delle illustrazioni</i>	326



## Prefazione

Questo libro nasce dall'esigenza di fornire agli studenti del corso di Laurea Magistrale in Scienze Chimiche un sussidio per lo studio dei principi e dei metodi della spettroscopia atomica, argomento di primaria importanza nell'ambito della chimica analitica strumentale. Il testo è rivolto anche agli studenti di discipline affini (biochimica, fisica, geologia, scienze ambientali, scienze forensi) e a chi, utilizzando una o più tecniche esaminate, desideri conoscere gli aspetti fondamentali delle stesse. Il livello di approfondimento scelto si colloca tra una presentazione introduttiva dei metodi strumentali e una trattazione approfondita ed esauriente, i cui riferimenti sono citati in Bibliografia. Inoltre, le tecniche sono trattate con diverso grado di dettaglio, privilegiando i metodi maggiormente diffusi.

Il capitolo I è dedicato alla teoria della spettroscopia atomica. Dopo un breve richiamo alla radiazione elettromagnetica e agli spettri atomici, sono presentati gli aspetti fondamentali della teoria moderna per l'interpretazione della posizione, intensità e ampiezza delle righe spettrali e dell'effetto del campo magnetico sugli spettri atomici. Inoltre, sono illustrate le proprietà fondamentali di un plasma, sistema fisico su cui sono basate alcune delle tecniche più importanti di spettrometria atomica. I capitoli II, III e IV trattano delle tecniche di spettrometria ottica basate su emissione, assorbimento e fluorescenza atomica. Per ciascuna tecnica, con un diverso grado di dettaglio a seconda dell'importanza della stessa, sono illustrati gli aspetti fondamentali relativi alla strumentazione, alle potenziali interferenze e ai metodi per ridurle, alle prestazioni analitiche e alle applicazioni. Il capitolo V è dedicato alla spettrometria di massa atomica, che comprende tecniche importanti

caratterizzate da prestazioni analitiche d'eccellenza. Come nei capitoli precedenti, la trattazione include la presentazione della strumentazione, l'illustrazione delle possibili interferenze e dei metodi sviluppati per la loro correzione, e la discussione delle prestazioni analitiche, anche in confronto con altre tecniche di spettrometria atomica. Il capitolo VI è inerente alla spettrometria a raggi X e, in particolare, alle tecniche basate sull'emissione, metodi importanti di analisi elementare. In questo caso la teoria, la strumentazione e le prestazioni analitiche sono illustrate nelle loro linee generali. Il capitolo VII presenta i principi e le caratteristiche fondamentali delle tecniche di spettroscopia elettronica, che costituiscono un insieme di metodi largamente impiegati per l'analisi delle superfici. Alla fine del capitolo, viene inoltre presentata una visione d'insieme delle tecniche di analisi di superficie e alcuni criteri per una loro valutazione comparativa.

Infine, desidero ringraziare alcuni colleghi che hanno revisionato i diversi capitoli del libro, offrendo importanti suggerimenti e correzioni: Proff. Ornella Abollino (Università di Torino), Carlo Barbante (Università di Venezia), Nicola Cioffi (Università di Bari) e Massimo Ottonelli (Università di Genova). Sono inoltre grato al Dr. Francisco Ardini per l'accurata correzione delle bozze.

Con la speranza che la lettura o uno studio più approfondito di questo libro possa suscitare molte domande e offrire qualche risposta, auguro a tutti una proficua lettura.

Marco Grotti



Tabella 9. Esempi di interferenze spettrali in ICP-MS.

Isotopo	Massa	Interferente	Massa	R
$^{39}\text{K}^+$	38.963707	$^{38}\text{Ar}^1\text{H}^+$	39.970557	5700
$^{40}\text{Ca}^+$	39.962591	$^{40}\text{Ar}^+$	39.962383	192 000
$^{51}\text{V}^+$	50.943960	$^{35}\text{Cl}^{16}\text{O}^+$	50.963767	2600
$^{53}\text{Cr}^+$	52.940649	$^{37}\text{Cl}^{16}\text{O}^+$	52.960817	2600
$^{56}\text{Fe}^+$	55.934938	$^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$	55.957298	2500
$^{63}\text{Cu}^+$	62.929598	$^{40}\text{Ar}^{23}\text{Na}^+$	62.952152	2800
$^{75}\text{As}^+$	74.921597	$^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}^+$	74.931236	7800
$^{80}\text{Se}^+$	79.916521	$^{40}\text{Ar}_2^+$	79.924766	9700

Uno schema di un ICP-MS con settore magnetico a doppia focalizzazione con geometria *Nier-Johnson* è riportato in Figura 144.

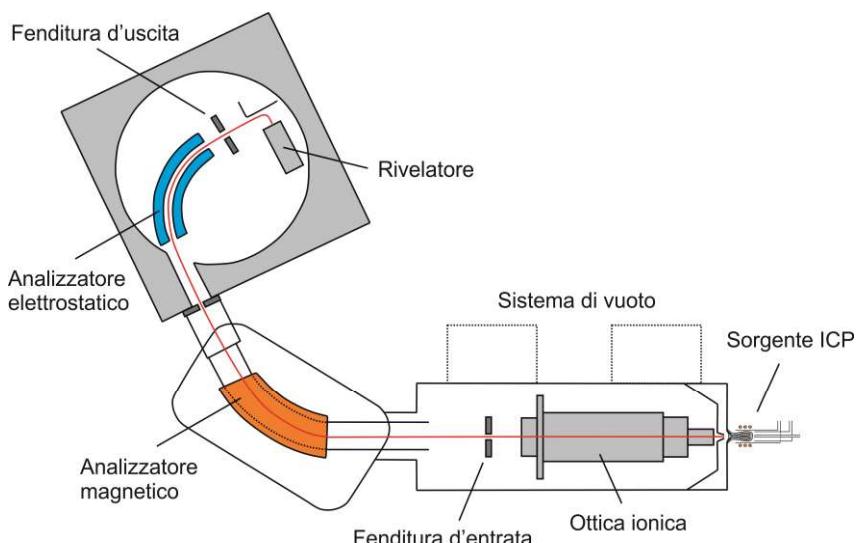


Figura 144. ICP-MS con settore magnetico a doppia focalizzazione.

L'ottica ionica e il sistema di vuoto sono molto più complessi rispetto a quelli di un analizzatore a quadrupolo. Gli ioni emergenti dall'interfaccia vengono accelerati da un potenziale di 5–8 keV e focalizzati sulla fenditura d'entrata, mediante un sistema di elementi quadrupolari statici, operanti ad un vuoto inferiore a  $10^{-7}$  Torr. A differenza degli spettrometri di massa organica, la sorgente e l'interfaccia vengono mantenuti a potenziale nullo e i componenti ad alto potenziale sono portati all'interno dello strumento, vicino all'analizzatore. Il sistema di vuoto è a cinque stadi (due in più rispetto al quadrupolo) e realizzato impiegando una pompa meccanica e quattro pompe turbomolecolari. L'analizzatore di massa è costituito dalla combinazione di un elettromagnete e di un analizzatore elettrostatico (ESA). Nella *configurazione standard* l'ESA è posizionato prima del magnete, mentre nella *configurazione inversa* è posizionato dopo di esso. L'analizzatore magnetico consiste in un tubo di volo curvo posto tra i poli di un elettromagnete (v. Fig. 145).

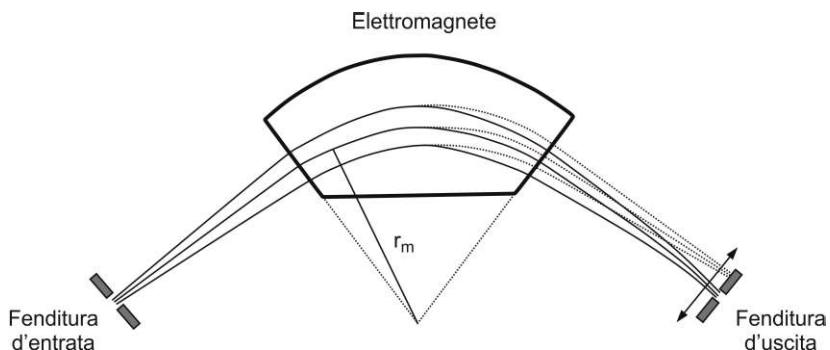


Figura 145. Analizzatore a settore magnetico.

Gli ioni prodotti nella sorgente vengono accelerati dal potenziale di accelerazione  $U$  e introdotti nel campo magnetico attraverso una fenditura d'entrata. Il campo magnetico, perpendicolare alla direzione degli ioni, determina una variazione della loro traiettoria. Uguagliando la forza indotta dal campo magnetico ( $Bzv$ ) e la forza centripeta ( $mv^2/r$ ), si ottiene la relazione:

$$mv / z = Br \quad (125)$$

dove m è la massa dello ione, z la sua carica, v la sua velocità, r il raggio della traiettoria e B il campo magnetico applicato. Considerando che l'energia cinetica dello ione ( $\frac{1}{2}mv^2$ ) è pari all'energia potenziale ( $Uz$ ), si può infine ottenere l'espressione:

$$m/z = r^2 B^2 / 2U \quad (126)$$

che è una delle relazioni fondamentali della spettrometria di massa. Da essa si deduce che, per un particolare valore del campo magnetico, la curvatura di uno ione avente un rapporto m/z che soddisfa la relazione (126) risulterà uguale alla curvatura del tubo di volo; in questa condizione, lo ione passerà attraverso la fenditura d'uscita e giungerà al rivelatore. Variando il campo magnetico, si possono perciò selezionare ioni a diverso rapporto m/z, che giungeranno al rivelatore attraverso la fenditura d'uscita. In altre parole, il settore magnetico focalizza ioni aventi lo stesso rapporto m/z ma traiettorie divergenti sulla fenditura d'uscita (focalizzazione delle traiettorie), mentre risulta dispersivo rispetto al rapporto m/z. In realtà, quest'ultima affermazione non è rigorosamente vera. Infatti, dalla relazione (125) risulta evidente come il campo magnetico sia in realtà dispersivo rispetto al rapporto tra il momento mv e la carica z. Perciò, ioni aventi lo stesso rapporto m/z ma diversa velocità (cioè diversa energia cinetica) verranno separati; analogamente, ioni aventi massa diversa ma lo stesso momento saranno selezionati insieme. Ciò determina un allargamento del picco di massa, in funzione dell'ampiezza della distribuzione delle energie cinetiche degli ioni prodotti nella sorgente, limitando la risoluzione ( $R \approx 2000$ ). Per ottenere una risoluzione maggiore, occorre accoppiare l'analizzatore magnetico ad un secondo elemento che consenta la focalizzazione dell'energia cinetica degli ioni. Tale elemento è l'analizzatore elettrostatico, schematizzato in Figura 146. L'ESA è costituito da due piastre curve alle quali viene applicata una differenza di potenziale di circa 0.5–1.0 kV. Uguagliando la forza elettrostatica ( $Ez/d$ ) e la forza centripeta ( $mv^2/r$ ), si ottiene la relazione:

$$mv^2 / z = Er / d \quad (127)$$

dove  $m$  è la massa dello ione,  $z$  la sua carica,  $v$  la sua velocità,  $r$  il raggio della traiettoria,  $d$  la distanza tra le piastre e  $E$  il potenziale applicato. Da tale relazione si deduce che il raggio dello ione dipende dalla sua energia cinetica. Perciò, variando  $E$  si possono focalizzare sulla fenditura d'uscita ioni aventi la stessa energia cinetica.

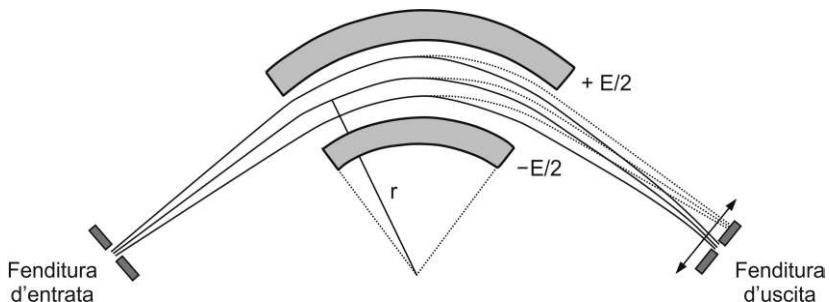


Figura 146. Analizzatore elettrostatico.

In conclusione, il settore magnetico risulta dispersivo sia rispetto alla massa che all'energia e focalizza sulla fenditura d'uscita ioni aventi lo stesso momento, mentre il settore elettrostatico risulta dispersivo solo rispetto all'energia, focalizzando sulla fenditura d'uscita ioni aventi la stessa energia. Accoppiando i due elementi (v. Fig. 147), si realizza così una doppia focalizzazione degli ioni, i quali risultano selezionati unicamente rispetto alla loro massa (rapporto  $m/z$ ), con un'elevata risoluzione ( $R$  fino a 10000).

In uno spettrometro di massa a doppia focalizzazione, il potere risolvente è dato dalla seguente espressione:

$$R = D_m / (w_e + w_u + \Delta_{abs}) \quad (128)$$

dove  $D_m$  è la lunghezza di dispersione dello spettrometro (tipicamente dello stesso ordine di grandezza del raggio di curvatura del magnete),  $w_e$  e  $w_u$  sono le ampiezze delle fenditure d'ingresso e d'uscita e  $\Delta_{abs}$  un termine che tiene conto delle aberrazioni del sistema (analoga a quanto si osserva in uno spettrometro ottico).

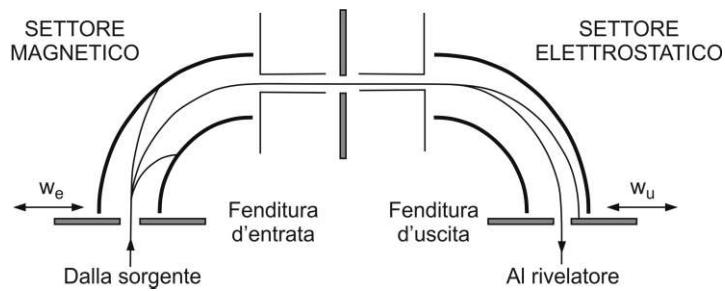


Figura 147. Schema di un analizzatore di massa a doppia focalizzazione.

Perciò, la risoluzione può essere variata regolando l'ampiezza delle fenditure, come mostrato in Figura 148.

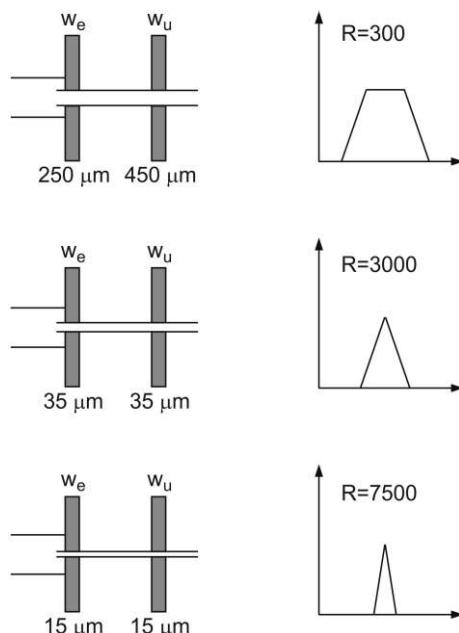


Figura 148. Effetto dell'ampiezza delle fenditure sulla risoluzione e sulla forma del picco.

L'ampiezza della fenditura influenza inoltre sulla forma del picco, che si presenta appiattito impiegando fenditure relativamente ampie e di forma triangolare con fenditure di ampiezza inferiore. Nel primo caso, si parla di picco *flat-topped*.

La maggior parte dei sistemi commerciali consente di operare in tre modalità: bassa ( $R=300\text{--}400$ ), media ( $R=3000\text{--}4000$ ) e alta risoluzione ( $R=8000\text{--}10000$ ). Un esempio della potenzialità degli strumenti basati sul settore magnetico a doppia focalizzazione è riportato in Figura 149, dove viene mostrata la risoluzione dei segnali relativi agli ioni  $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$  e  $^{56}\text{Fe}^+$ , che non è possibile distinguere impiegando un filtro di massa a quadrupolo.

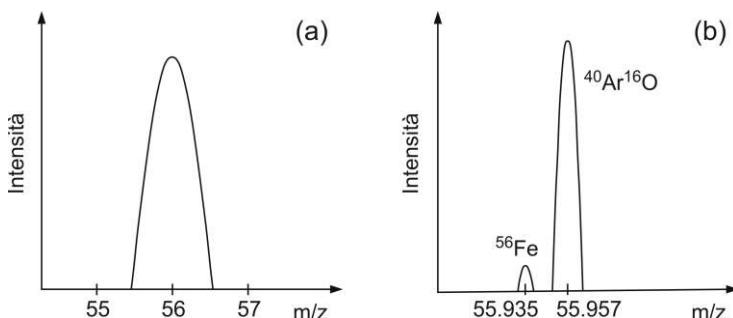


Figura 149. Confronto tra (a) quadrupolo e (b) settore magnetico a doppia focalizzazione nella risoluzione dell'interferenza di  $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$  su  $^{56}\text{Fe}^+$ .

Tuttavia, è importante osservare che un aumento di risoluzione comporta una riduzione della trasmissione ionica (v. Fig. 150). Ad esempio, un aumento di  $R$  da 400 a 10000 determina una diminuzione della trasmissione del 98%. Perciò, l'alta e media risoluzione vengono applicate solo nei casi in cui sia effettivamente necessario per risolvere le interferenze poliatomiche.



Marco Grotti

# Metodi spettroscopici per l'analisi elementare

Accedi ai **contenuti digitali** ➤ Espandi le tue risorse ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere ai **contenuti digitali**. L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.

