

Σύγχρονες Αναλυτικές Τεχνικές

Διάλεξη 5
-Ατομική Φασματομετρία

Αλίκη Ντζιφά, PhD
2024

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ

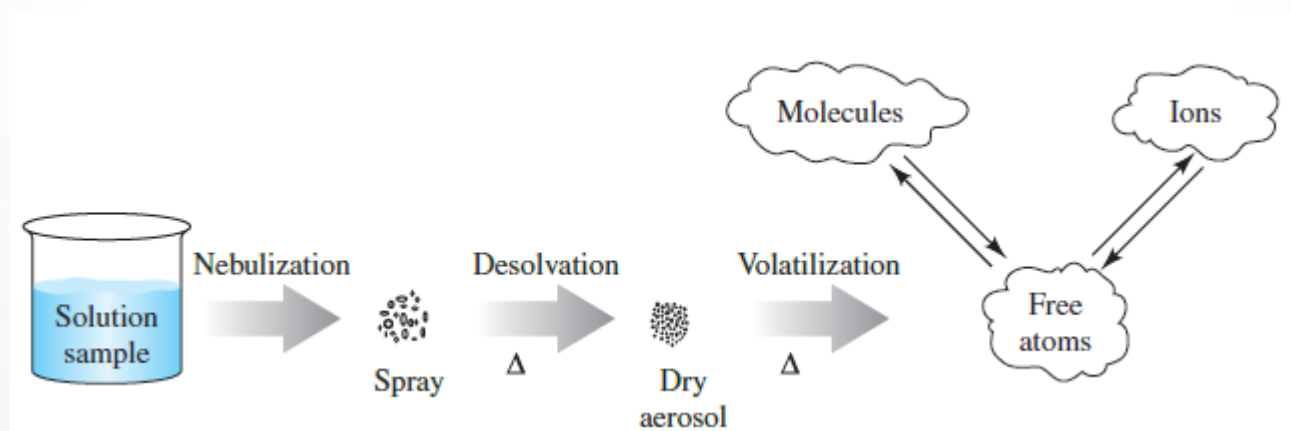
- ❑ Περιλαμβάνει τις φασματοσκοπικές τεχνικές που βασίζονται στην αλληλεπίδραση ατόμων σε αέρια φάση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.



Στοιχειακή Ανάλυση: Προσδιορισμός της συγκέντρωσης σε διάλυμα ή περιεκτικότητας σε στερεό δείγμα στοιχείων

Ποιοτική ανάλυση: με βάση το **χαρακτηριστικό μήκος κύματος** της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που απορροφάται ή εκπέμπεται από ένα δείγμα

Ποσοτική ανάλυση: με βάση **το ποσό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** που απορροφάται ή εκπέμπεται από ένα δείγμα



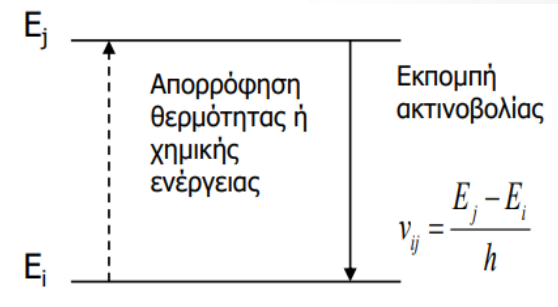
ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ

Το δείγμα εκτίθεται σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια:

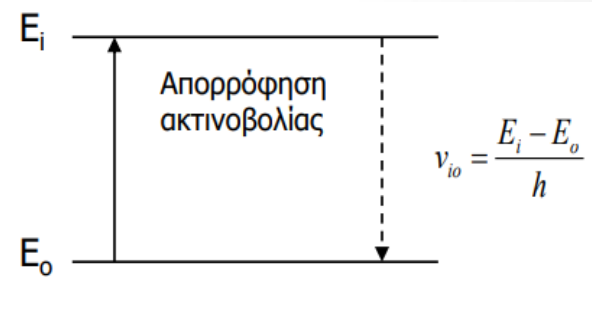
- Εξαέρωση
- Ατομοποίηση

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

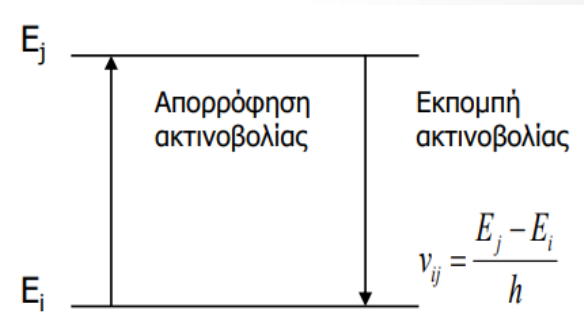
i. Διέγερση με επιπλέον ενέργεια και εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας (Atomic Emission Spectrometry-**AES**)



ii. Απορρόφηση μονοχρωματικής ακτινοβολίας (Atomic Absorption Spectrometry-**AAS**)



iii. Διέγερση με τη βοήθεια ακτινοβολίας και εκπομπή ατομικού φθορισμού (Atomic Fluorescence Spectrometry-**AFS**)



- ❖ Για το ίδιο αέριο άτομο το λ εκπομπής = λ απορρόφησης = λ φθορισμού
- ❖ όση ενέργεια λαμβάνει τόση εκπέμπει-Απλά φάσματα

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ

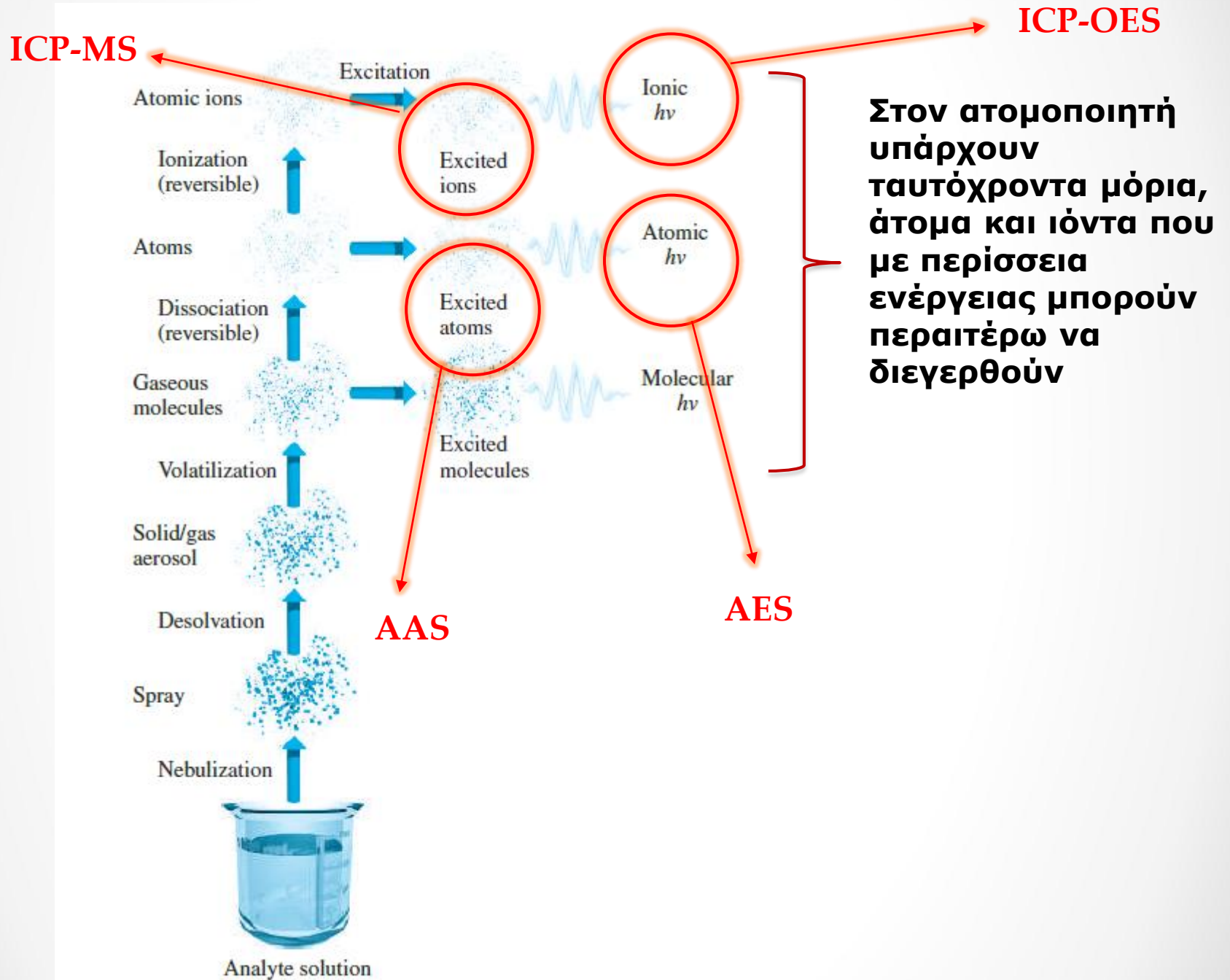


FIGURE 9-1 Processes occurring during atomization.

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

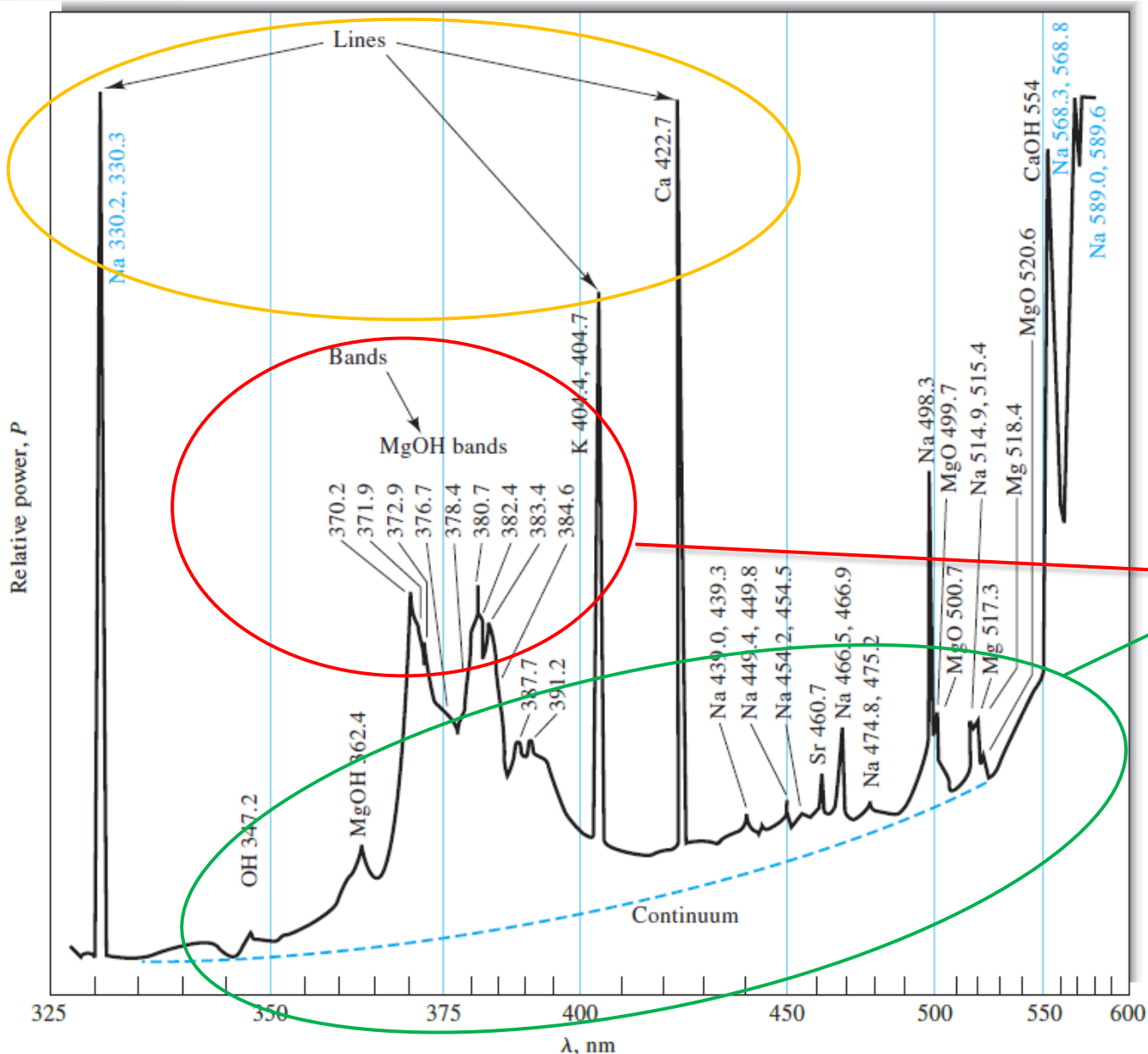
ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

$$E_1 - E_0 = h\nu = hc/\lambda$$

□ ΦΑΣΜΑΤΑ

- **Γραμμωτά**-όταν τα εκπεμπόμενα σωματίδια είναι μεμονωμένα άτομα που απέχουν αρκετά μεταξύ τους στην αέρια φάση-οξείες κορυφές
- **Ταινιωτά**-όταν είναι παρούσες αέριες ρίζες ή μικρά μόρια-το όργανο δεν μπορεί να ξεχωρίσει τις γραμμές-οι ταινίες προκύπτουν από αναρίθμητα κβαντισμένα δονητικά επίπεδα που προστίθενται στο ηλεκτρονιακό ενεργειακό επίπεδο της θεμελιώδους κατάστασης του μορίου
- **Συνεχή** -σωματίδια που δεν έχουν εξαερωθεί αλλά πυρακτώνονται και εκπέμπουν ακτινοβολία μέλανος σώματος (από τις αναρίθμητες ατομικές & μοριακές ταλαντώσεις που διεγείρονται στο συμπυκνωμένο στερεό από τη θερμική ενέργεια)

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ



Ακτινοβολία υποβάθρου – πρέπει να αφαιρεθεί από τις μετρήσεις
Φασματική παρεμπόδιση

ΑΤΟΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

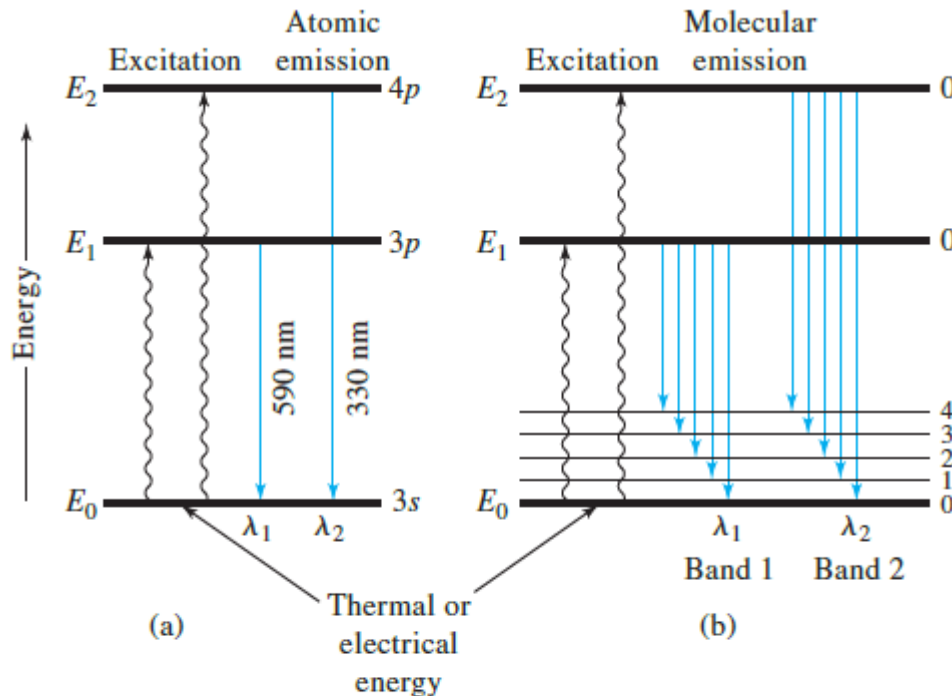
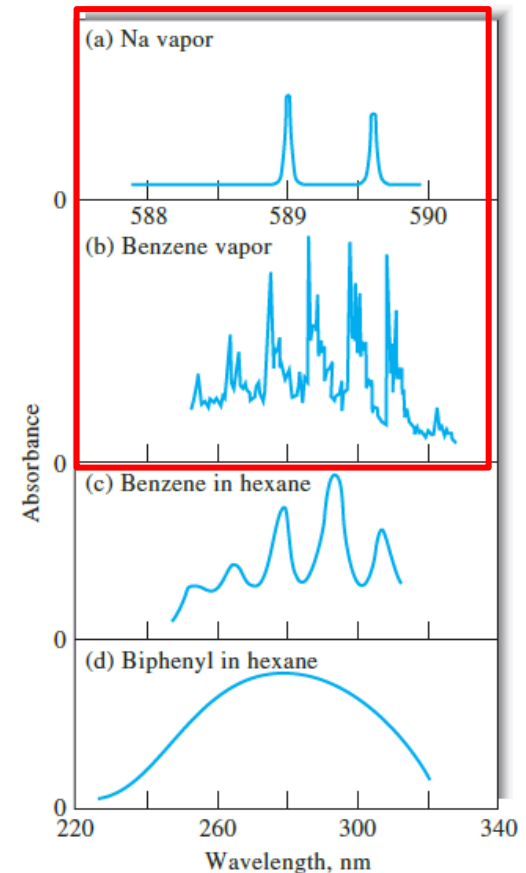


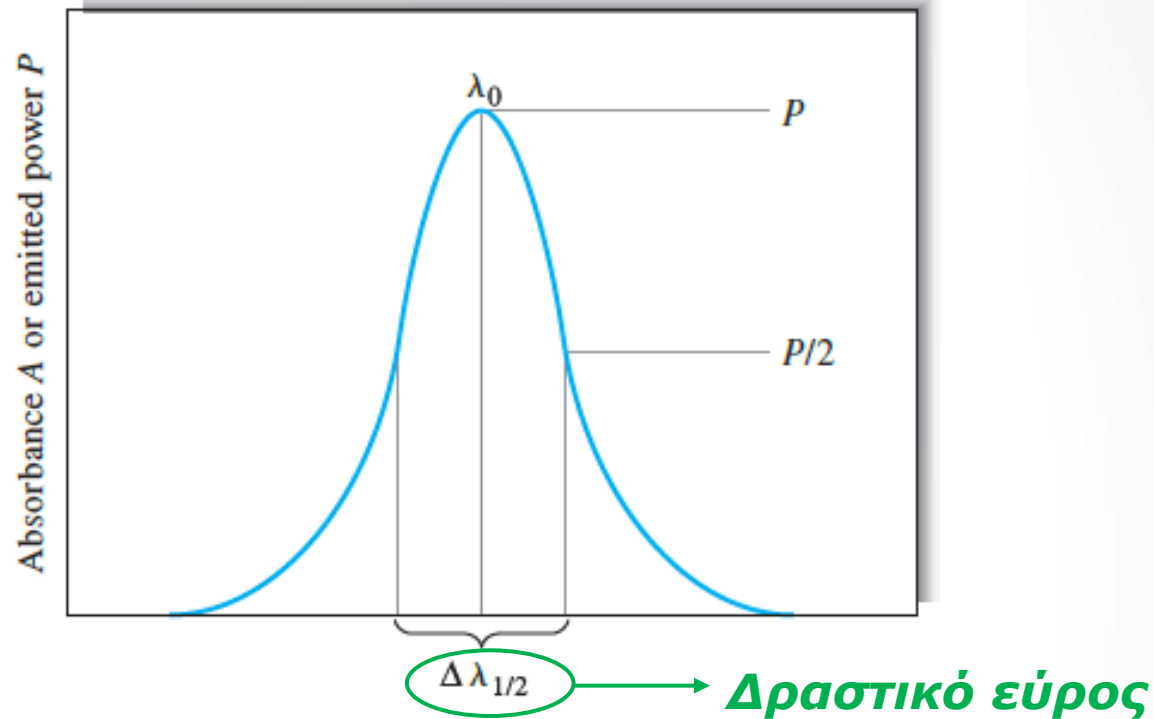
FIGURE 6-21 Energy-level diagrams for (a) a sodium atom showing the source of a line spectrum and (b) a simple molecule showing the source of a band spectrum.



- ❑ Ατομική Απορρόφηση: Απλά φάσματα με στενές γραμμές απορρόφησης (π.χ. ατμοί Na). Οι στενές ατομικές γραμμές οφείλονται μόνο σε ηλεκτρονιακές μεταπτώσεις.
- ❑ Στο μοριακό φάσμα υπάρχουν δονητικές καταστάσεις σε κάθε ηλεκτρονιακή στάθμη. Άρα, τα φάσματα είναι πιο πολύπλοκα καθώς παρουσιάζουν πολλαπλές ταινίες/ζώνες

$$E = E_{\text{ηλεκτρονιακή}} + E_{\text{δονητική}} + E_{\text{περιστροφική}}$$

ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ



- ❑ **Θεωρητικά** το εύρος των φασματικών γραμμών να είναι μηδενικό λόγω μονοχρωματικής ακτινοβολίας, δηλ. οι μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων μεταξύ δύο εντελώς διακριτών ενεργειακών καταστάσεων
- ❑ **Διεύρυνση ατομικών γραμμών (max 20pm)**
 1. Φυσική διεύρυνση
 2. Φαινόμενο Doppler
 3. Φαινόμενο Lorentz
 4. Φαινόμενο Zeeman

ΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΥΡΥΝΣΗ

□ Αρχή απροσδιοριστίας Heisenberg

$$\Delta t \geq 1/\Delta \nu$$

$$c = \nu \lambda = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\Delta t \Delta \nu \geq 1$$

□ Παράδειγμα

Ο μέσος χρόνος ζωής μια διεγερμένης κατάστασης ατμού Hg, που προκύπτει με ακτινοβολή στα 257,3 nm, είναι 2×10^{-8} s. Να υπολογιστεί προσεγγιστικά το εύρος της γραμμής φθορισμού που παράγεται.

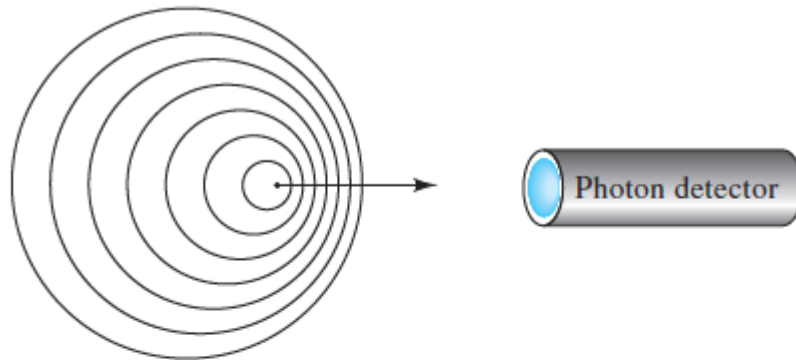
$$\Delta \nu \cdot \Delta t \geq 1, \Delta t = 2 \times 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow \Delta \nu = 5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}.$$

Όμως $\nu = c/\lambda$ και με διαφορίση: $d\nu = -c \, d\lambda / \lambda^2$ Αν υποθέσουμε ότι $d\nu \approx \Delta \nu$

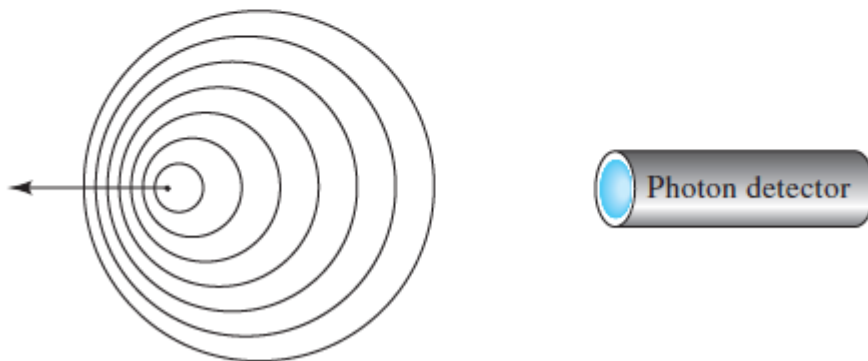
και $d\lambda \approx \Delta \lambda_{1/2}$ Τότε:

$$|\Delta \lambda_{1/2}| = \frac{\lambda^2 \Delta \nu}{c} = 1,1 \times 10^{-14} \text{ m} = 1,1 \times 10^{-4} \text{ \AA} = 0,011 \text{ pm}$$

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ DOPPLER



(a)



(b)

➤ Άτομο κινούμενο με την κατεύθυνση της εισερχόμενης ακτινοβολίας βλέπει τα κυματικά μέτωπα συχνότερα και έτσι απορροφά ακτινοβολία, η οποία στην πραγματικότητα έχει υψηλότερη συχνότητα

➤ Άτομο κινούμενο αντίθετα προς την κατεύθυνση της εισερχόμενης ακτινοβολίας βλέπει τα κυματικά μέτωπα αραιότερα και έτσι απορροφά ακτινοβολία, η οποία στην πραγματικότητα έχει χαμηλότερη συχνότητα

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ LORENTZ

- Τα άτομα που εκπέμπουν ή απορροφούν συγκρούονται μεταξύ τους.
- Οι κρούσεις αυτές ή η πίεση προκαλούν μικρές μεταβολές στην ενέργεια των βασικών ενεργειακών καταστάσεων.
- Φλόγα: τα άτομα του αναλύτη συγκρούονται με διάφορα προϊόντα καύσης
- Λυχνίες HCL ή EDL (AAS): Συγκρούσεις μεταξύ ομοίων ατόμων
- Διεύρυνση της τάξης μερικών pm

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

□ **ΚΑΤΑΝΟΜΗ Boltzmann**

$$\frac{N_j}{N_o} = \frac{g_j}{g_o} \exp\left(-\frac{\Delta E_j}{kT}\right)$$

Ο λόγος N_j/N_o :

- Αυξάνεται με αύξηση της T
- Μειώνεται εκθετικά με ελάττωση του λ

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

- Η ευαισθησία των μεθόδων ΑΕ αυξάνεται όσο το λ είναι μεγαλύτερο (αλκάλια και αλκαλικές γαίες)

Στοιχείο	Γραμμή συν/σμού (nm)	$\frac{g_j}{g_0}$	Ενέργεια διεγέρσεως (eV)	N_j/N_0		
				2000K	3000K	4000K
Cs	852,1	2	1,46	$4,44 \times 10^{-4}$	$7,24 \times 10^{-3}$	$2,98 \times 10^{-2}$
Na	589,0	2	2,11	$9,86 \times 10^{-6}$	$5,88 \times 10^{-4}$	$4,44 \times 10^{-3}$
Ca	422,7	3	2,93	$1,21 \times 10^{-7}$	$3,69 \times 10^{-5}$	$6,04 \times 10^{-4}$
Zn	213,9	3	5,80	$7,29 \times 10^{-15}$	$5,38 \times 10^{-10}$	$1,48 \times 10^{-7}$

1. $N_j \ll N_0$ ($N_j \rightarrow$ AES, ενώ $N_0 \rightarrow$ AAS, AFS)
2. Μικρή μεταβολή στην T επηρεάζει σημαντικά την ισχύ της ΑΕ: για το Na $\Delta T = 10K \rightarrow \Delta N = +4\%$

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

- Στις τεχνικές AES απαιτείται αυστηρός έλεγχος T ατομοποίησης. Αυτό δεν είναι απαραίτητο στις τεχνικές AAS και AFS αφού αυτές βασίζονται στο $>99,9\%$ των ατόμων του αναλύτη
- Θεωρητικά μια τεχνική AA αναμένεται πιο ευαίσθητη από μια τεχνική AE. Αυτό αντισταθμίζεται από τις διαφορικές μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στην AA ($A = \log P_0 - \log P$) οπότε αναμένονται μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα. Οι τεχνικές AA και AE είναι συμπληρωματικές. Από θεωρητικής απόψεως, αναμένεται η AFS να είναι η πλέον ευαίσθητη, ωστόσο εφαρμόζεται σε μικρό αριθμό στοιχείων.

ΑΤΟΜΟΠΟΙΗΤΕΣ

Πηγές που χρησιμοποιούνται για ατομοποίηση:

- Φλόγα (1700 – 3150°C)
- Ηλεκτρικά θερμαινόμενος φούρνος γραφίτη (1200 – 3000°C)
- Επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα αργού (ICP: 4000 – 6800°C)
- Ηλεκτρικό τόξο (4000 – 5000°C) ή σπινθήρας εκκένωσης (~40.000°C [;]) συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος
- Πλάσμα εκκένωσης λάμπης (glow discharge)

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

- ❑ Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης (AAS: FAAS, ETAAS, HGAAS, CVAAS, κ.ά.)
- ❑ Φλογοφωτομετρία Ατομικής Εκπομπής (FAES)
- ❑ Ατομικός Φθορισμός (AFS)
- ❑ Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-OES)
- ❑ Φασματομετρία ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP- MS)

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος Αργού

Πλάσμα: αεριώδες, ηλεκτρικά αγωγίμο μίγμα που περιέχει σημαντικές συγκεντρώσεις κατιόντων και ηλεκτρονίων (ηλεκτρικά ουδέτερο)

Πλάσμα Ar → συχνότερα χρησιμοποιούμενο στις αναλύσεις εκπομπής
→ Ιόντα Ar σχηματίζουν το πλάσμα, απορροφούν ενέργεια από εξωτερική πηγή, διατηρούν τη θερμοκρασία → περαιτέρω ιοντισμό

❖ **Επαγωγικώς συζευγμένο πλάσμα-
inductively coupled plasma (ICP)**

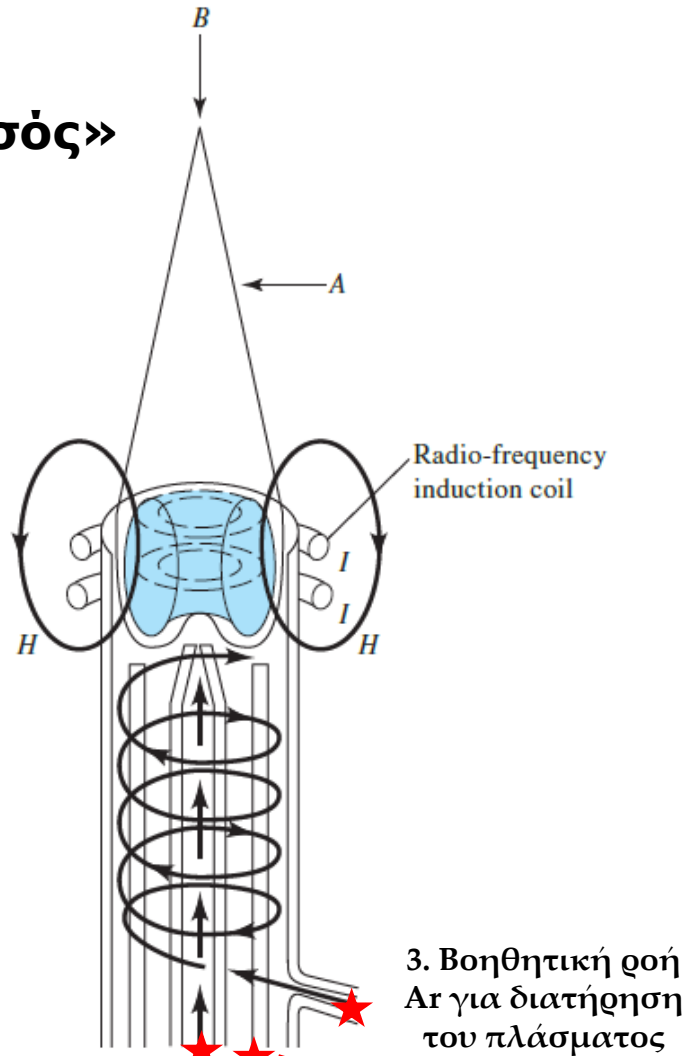
❖ ICP-AES (Atomic Emission Spectrometry)

ή
❖ **ICP-OES (Optical Emission Spectrometry)**



Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος Αργού (ICP-AES)

«πυρσός»



1. Το δείγμα εισέρχεται από έναν εκνεφωτή και παρασύρεται από Ar

2. Ροή Ar υπεύθυνη για τη δημιουργία του πλάσματος

- Από 3 ομόκεντρους σωλήνες «πυρσός» από τους οποίους ρέει αέριο Ar-3 ροές Ar
- Γύρω από τον εξωτερικό-υδρόψυκτο επαγωγικό πηνίο ραδιοσυχνοτήτων
- Τα ιόντα και τα e- που σχηματίζονται αλληλεπιδρούν με το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο-σε κλειστές δακτυλιοειδείς διαδρομές
- Λόγω αντίστασης στην κίνηση των ιόντων αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος Αργού (ICP-OES)

Αποδιαλύτωση-σχηματισμός αερολύματος → Ατομοποίηση → Διέγερση → Ιοντισμός

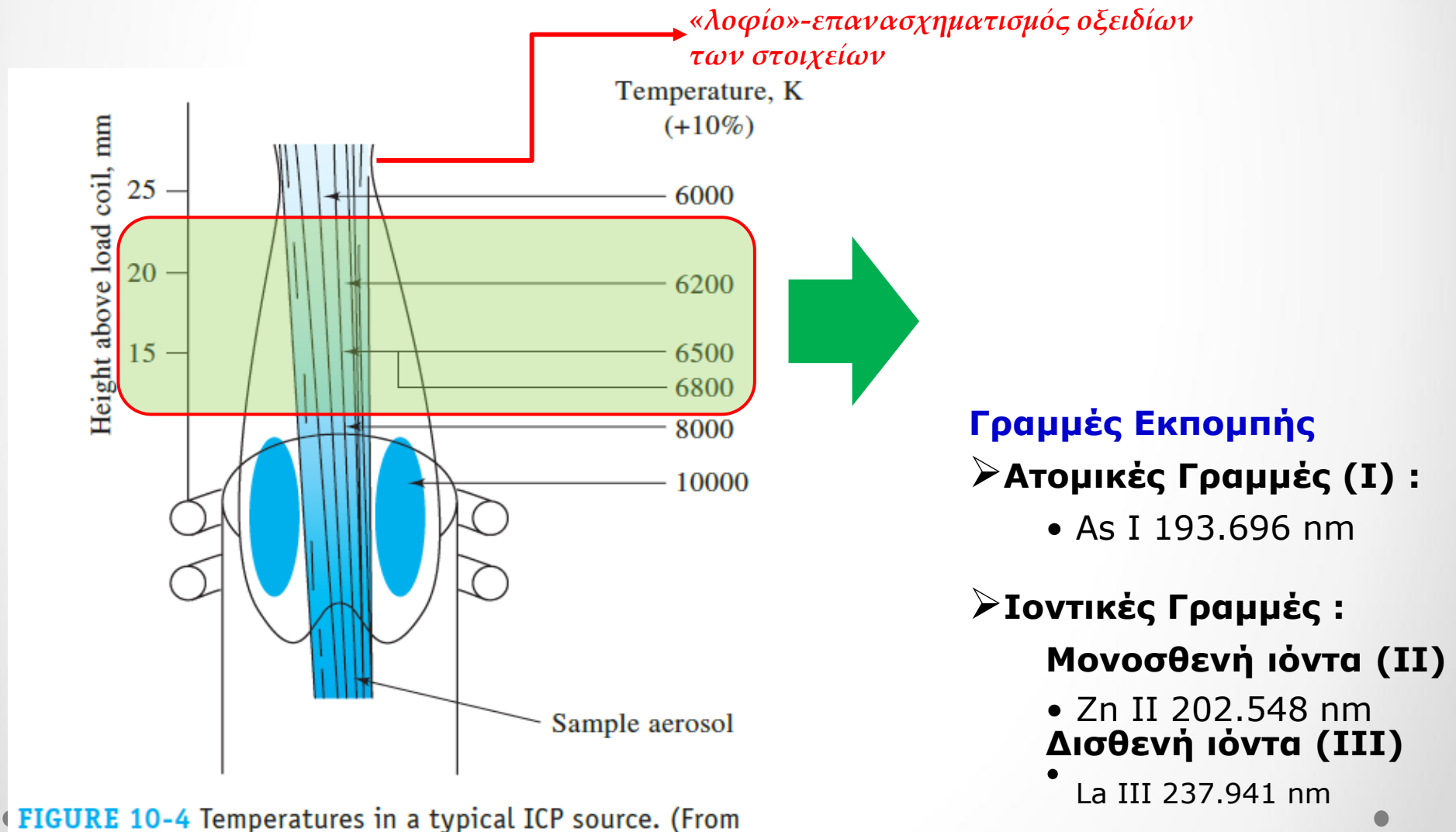
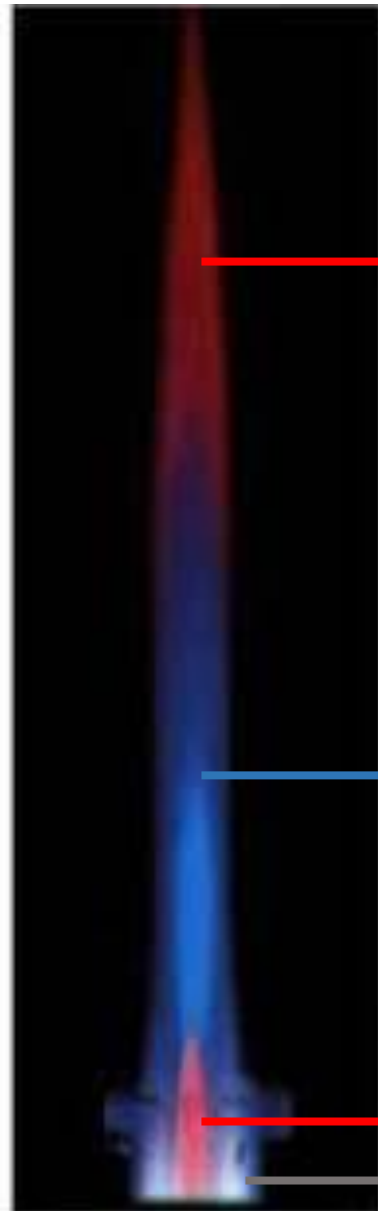


FIGURE 10-4 Temperatures in a typical ICP source. (From

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος Αργού (ICP-OES)

«πυρσός
πλάσματος»



• **Διάλυμα Υ στο
πλάσμα**

Επανασηματισμός
ΥΟ

Εκπεμπόμενη
ακτινοβολία από Υ+
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΖΩΝΗ

ΥΟ

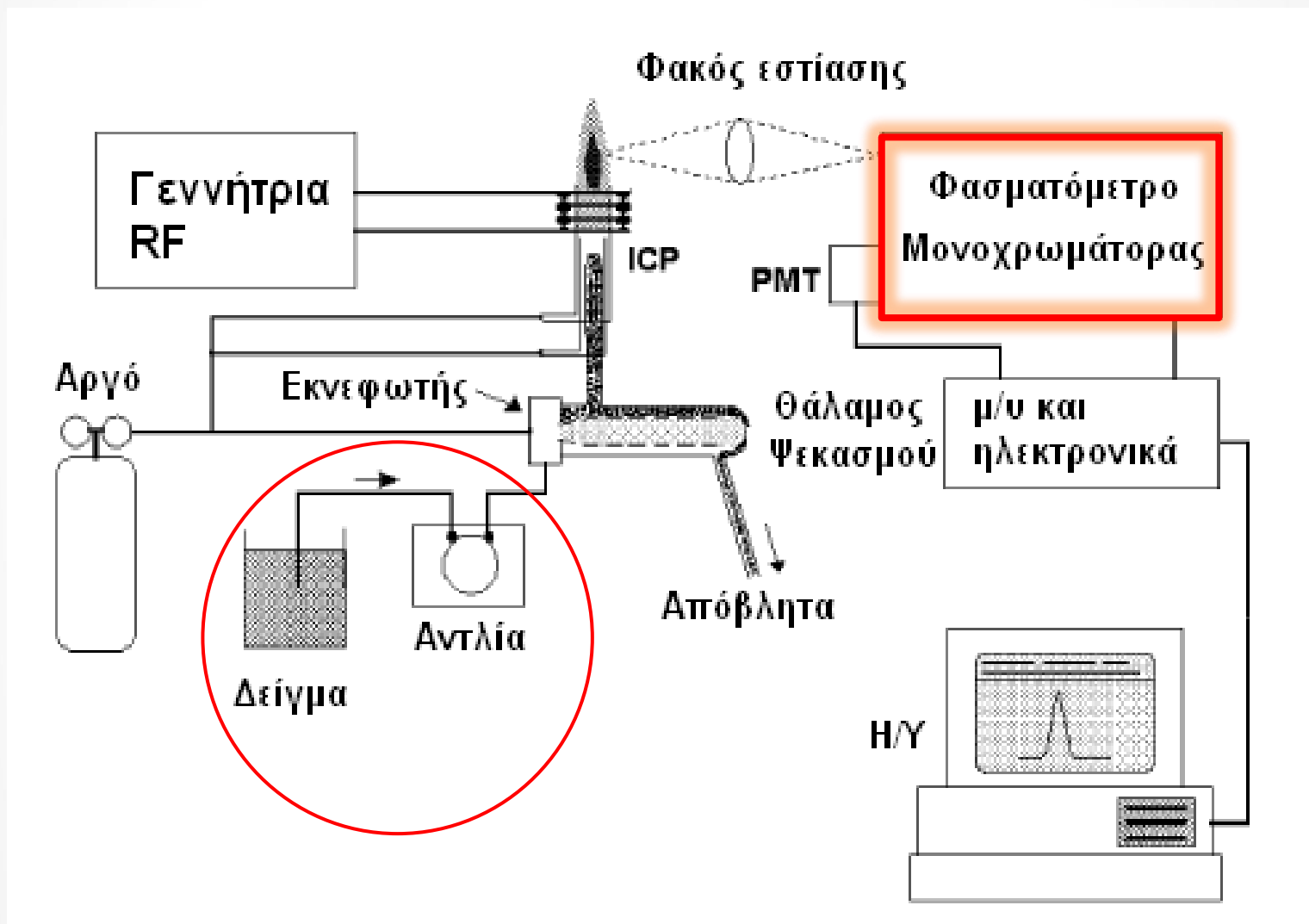
10.000K- πλάσμα

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος Αργού (ICP-AES)

- ✓ Οι θερμοκρασίες είναι 2-3 φορές υψηλότερες από τις τεχνικές φλόγας
- ✓ Δεν υπάρχουν χημικές παρεμποδίσεις (χημικά αδρανές περιβάλλον)
- ✓ Δεν υπάρχουν παρεμποδίσεις ιοντισμού (περίσσεια e⁻ από τον ιοντισμό του Ar)
- ✓ Δεν υπάρχει αυτοαπορρόφηση
- ✓ Μεγάλες γραμμικές περιοχές

ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ ICP-OES



ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ICP-OES

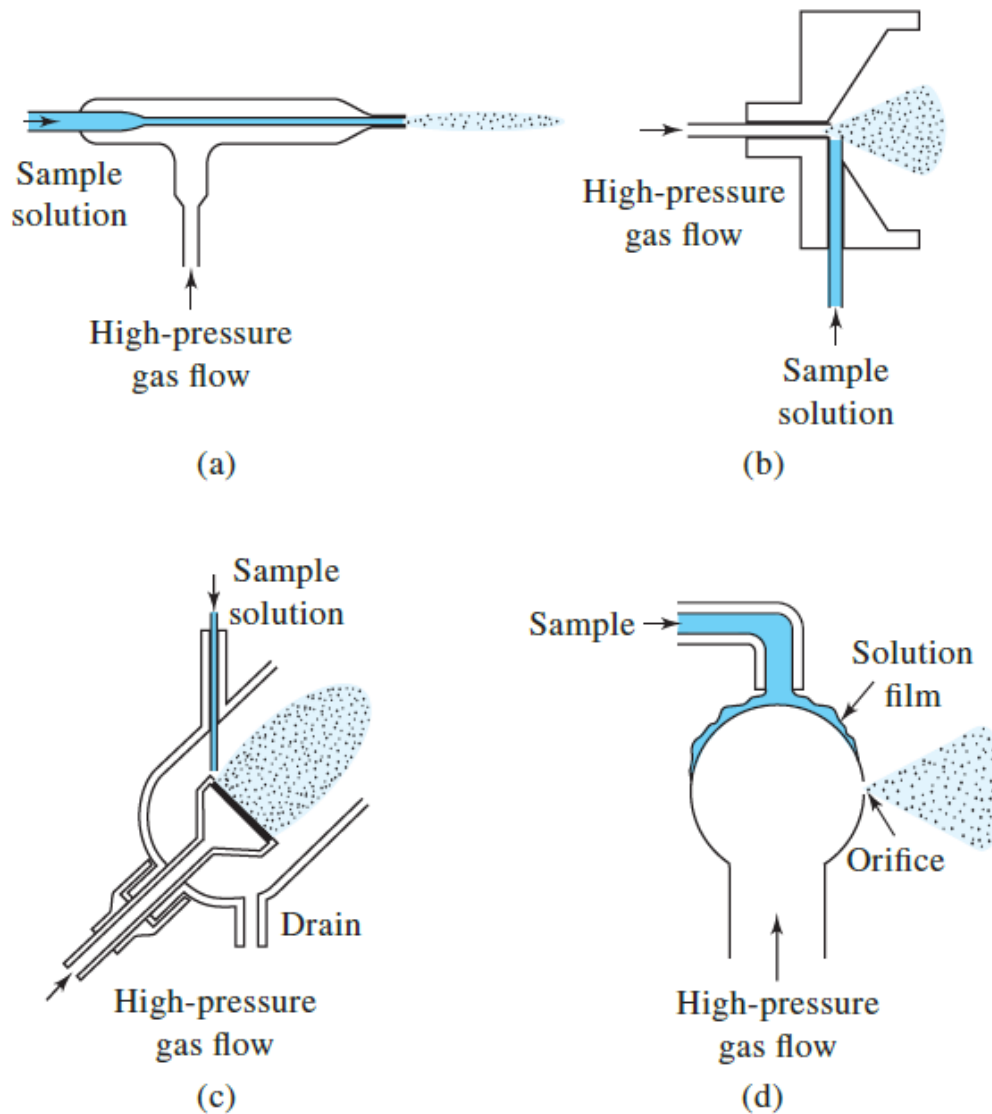
Μέθοδος	Τύπος δείγματος
Πνευματική εκνέφωση	Διάλυμα ή εναιώρημα
Υπερηχητική εκνέφωση	Διάλυμα
Ηλεκτροθερμική εξαέρωση	Στερεό, υγρό, διάλυμα
Παραγωγή υδριδίου	Διάλυμα (λίγα στοιχεία)
Απευθείας εισαγωγή	Στερεό, σκόνη
Θερμική αποσύνθεση με λέιζερ	Στερεό, κράματα
Θερμική αποσύνθεση με τόξο ή σπινθήρα	Αγώγιμο στερεό
Ψεκασμός με εκκένωση λάμπης	Αγώγιμο στερεό

- Εκνεφωτής υπερήχων
- Παραγωγή υδριδίων (HG)
- **Ηλεκτροθερμικοί εξαερωτές (ETV)**
- **Αποσύνθεση με λέιζερ (laser ablation, LA)**

Στερεα
δειγματα

ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ICP-OES

Πνευματικοί εκνεφωτές



2 τύποι:
• Συγκεντρικός
• Διασταυρούμενης ροής

FIGURE 8-11 Types of pneumatic nebulizers: (a) concentric tube, (b) cross-flow, (c) fritted disk, (d) Babington.

ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΑ ICP-OES

Επιθυμητές ιδιότητες φασματομέτρου εκπομπής με ICP:

1. Υψηλή **διακριτική ικανότητα** ($\Delta\lambda < 0,010\text{nm}$ ή $\lambda/\Delta\lambda > 100000$)
2. Ταχεία συλλογή και επεξεργασία δεδομένων
3. Χαμηλή παράσιτη ακτινοβολία
4. Μεγάλη δυναμική περιοχή
5. Ακριβής και επαναλήψιμη αναγνώριση και επιλογή λ
6. Επαναλήψιμες μετρήσεις ($< 1\%$ RSD σε $C = 500 \times \text{LOD}$)
7. Υψηλή σταθερότητα
8. Εύκολη διόρθωση υποβάθρου
9. Έλεγχος με εύχρηστο λογισμικό

ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΑ ICP-OES

Τύποι οργάνων:

- Όργανα αλληλουχίας ή διαδοχικής σάρωσης (**sequential ICP**) με συνεχή ή αλματική σάρωση.
- **Παράλληλα πολυδιαυλικά όργανα (simultaneous ICP)**
- Όργανα μετασχηματισμού Fourier

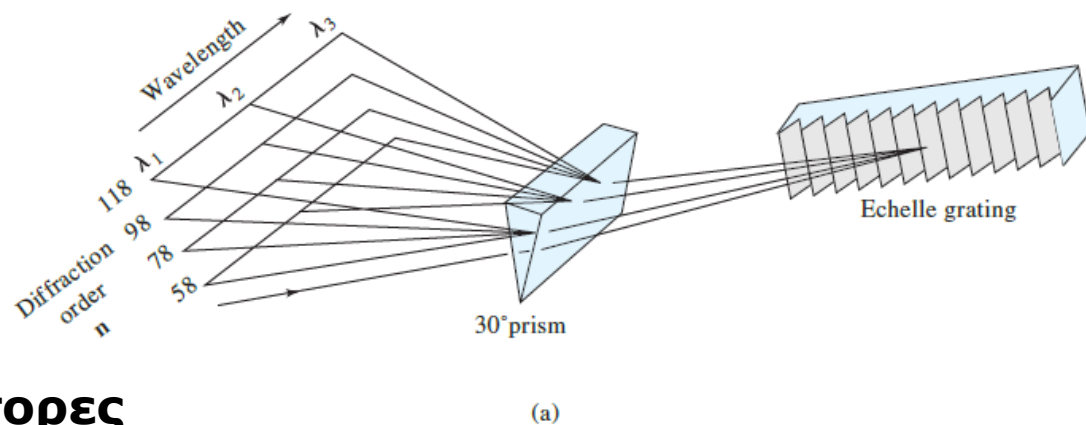
Οπτικά συστήματα σε φασματοόμετρα ICP-OES:

- Μονοχρωμάτορας
- Συμβατικά φράγματα
- **κλιμακωτά φράγματα τύπου Echelle**
- Πολυχρωμάτορας

Ανιχνευτές:

- Φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs)
- **Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης (SSDs: CTD)**

ΠΟΛΥΔΙΑΥΛΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΑ ICP-OES



Μονοχρωμάτορες echelle

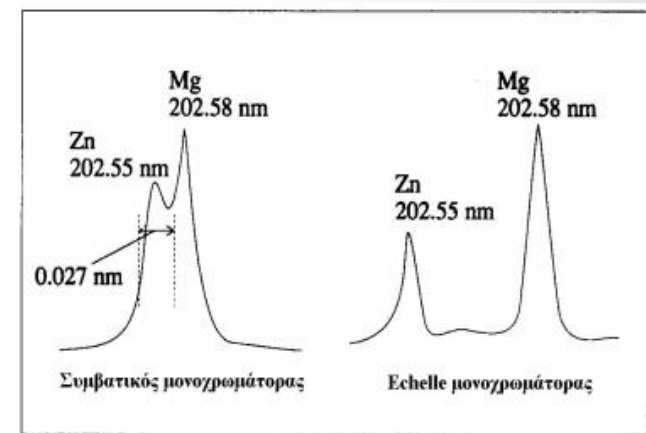
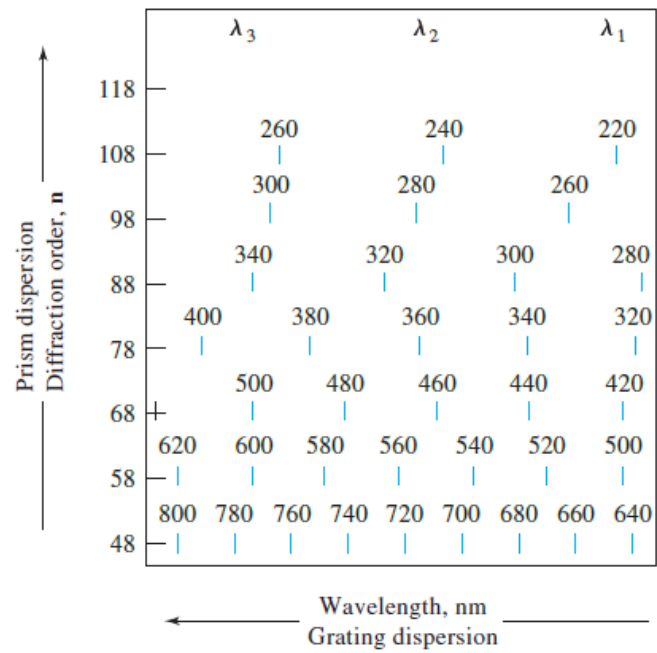
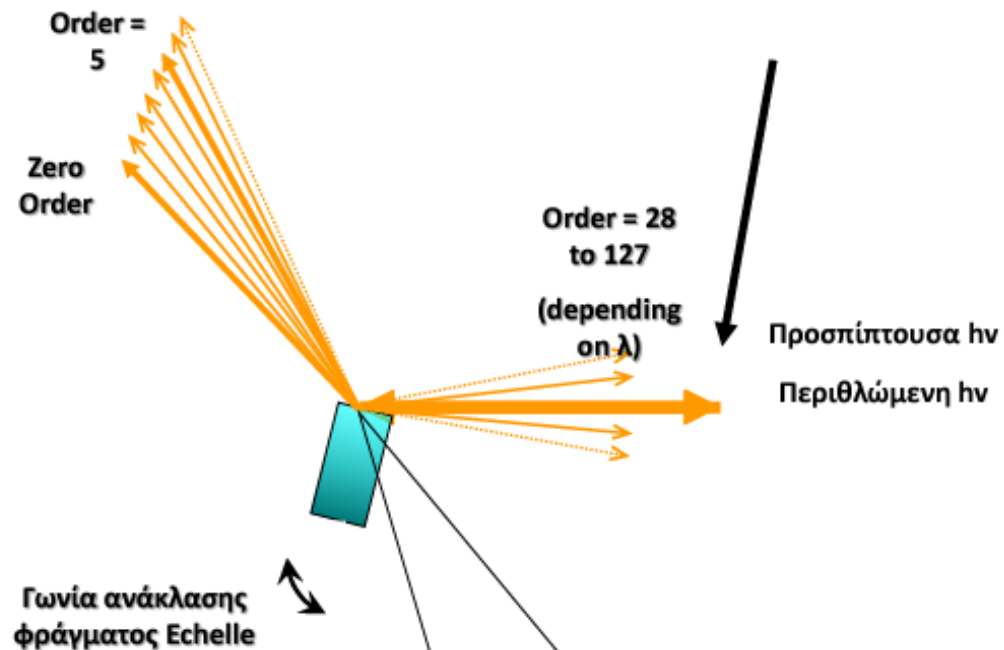


FIGURE 7-23 An echelle monochromator: (a) arrangement of dispersing elements, and (b) schematic end-on view of the dispersed radiation from the point of view of the transducer.

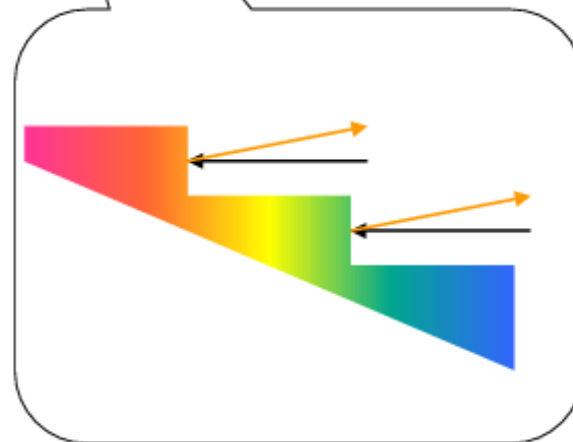
ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΣΕ ΦΡΑΓΜΑ echelle

Επειδή το φράγμα echelle χρησιμοποιείται με πολύ μεγάλες τάξεις, τα μήκη κύματος σε μια τάξη διασπείρονται σημαντικά

Η μέγιστη διασπορά επιτυγχάνεται σε μεγάλες τάξεις περιθλάσης (εκεί όπου η γωνία ανάκλασης ταυτίζεται με τη γωνία πρόσπτωσης)



Η γωνία ανάκλασης στο φράγμα Echelle καθορίζεται από μηχανικό οδηγό έτσι ώστε το επιθυμητό λ της κατάλληλης τάξης να οδηγείται στο πρίσμα

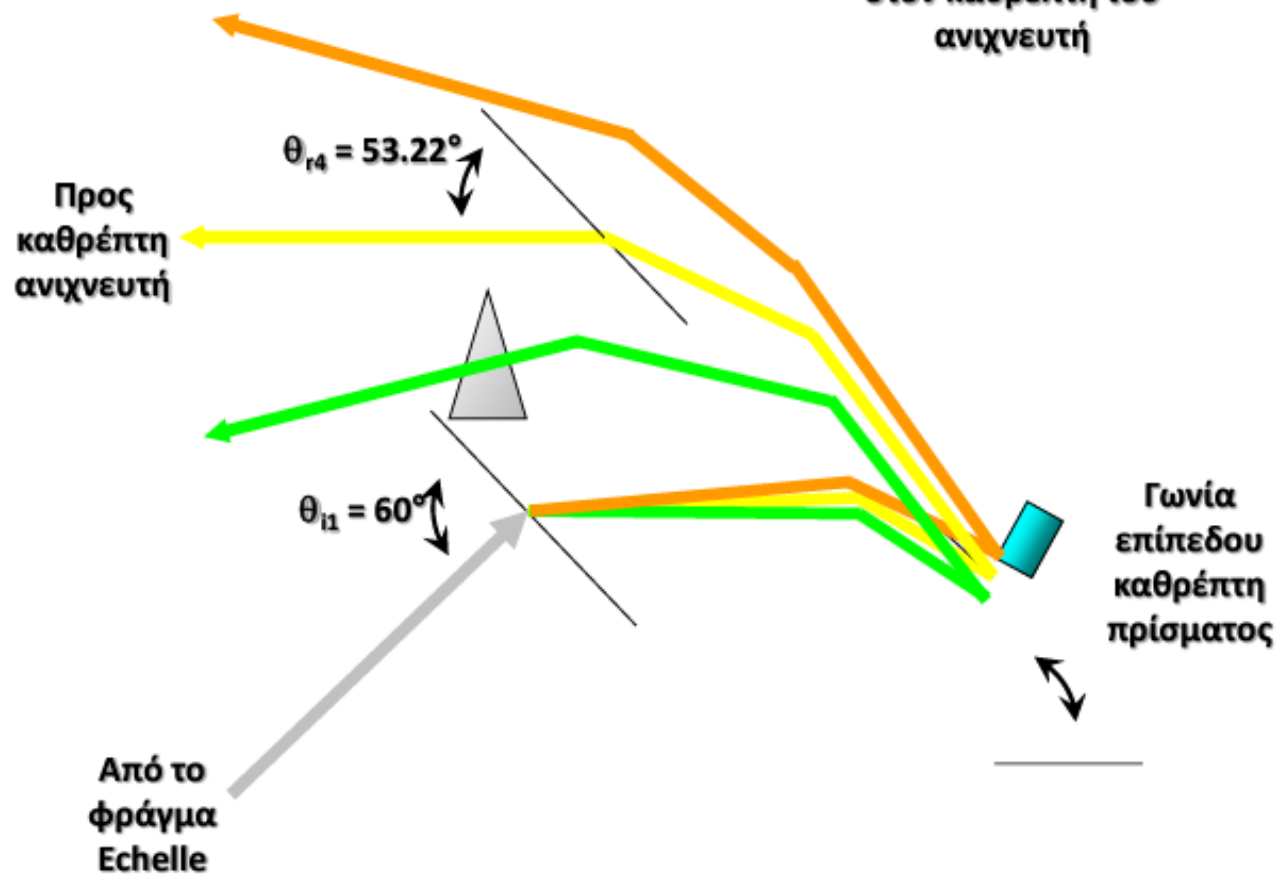


ΔΙΑΣΠΟΡΑ λ ΣΤΟ ΠΡΙΣΜΑ

Η διασπορά του λ στο πρίσμα είναι σημαντικά χαμηλότερη από ότι στο φράγμα Echelle

Χρησιμοποιείται μόνο για να αποφευχθούν επικαλύψεις

Η γωνία του επίπεδου καθρέπτη του πρίσματος ρυθμίζεται από μηχανικό οδηγό έτσι ώστε το επιθυμητό λ να οδηγείται στον καθρέπτη του ανιχνευτή



ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Ανιχνευτές μεταφοράς φορτίου (CTD):

Ημιαγωγοί οι οποίοι αποτελούνται από σειρές (arrays) μεταλλακτών ή εικονοστοιχείων (pixels) σε δισδιάστατη ψηφίδα, οι οποίοι συσσωρεύουν φορτίο όταν εκτίθενται σε προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Κατά τη λειτουργία τους, πρώτα εκτίθενται σε ακτινοβολία και μετά «καταχωρούν» την εγγραφή ("read"). Κατά τη διάρκεια της εγγραφής συνήθως ο ανιχνευτής δεν εκτίθεται σε φως. Βρίσκονται πάντα υπό ψύξη ($<0^{\circ}\text{C}$).

Έχουν μεγαλύτερη κβαντική απόδοση από τους PMTs και εξαιρετικά χαμηλό θόρυβο.

Δύο τύπους:

Μεταλλάκτης έκχυσης φορτίου (CID)

Μεταλλάκτης σύζευξης φορτίου (CCD)

Πολυδιαυλικό φασματοόμετρο echelle με ανιχνευτή CCD κατά τμήματα

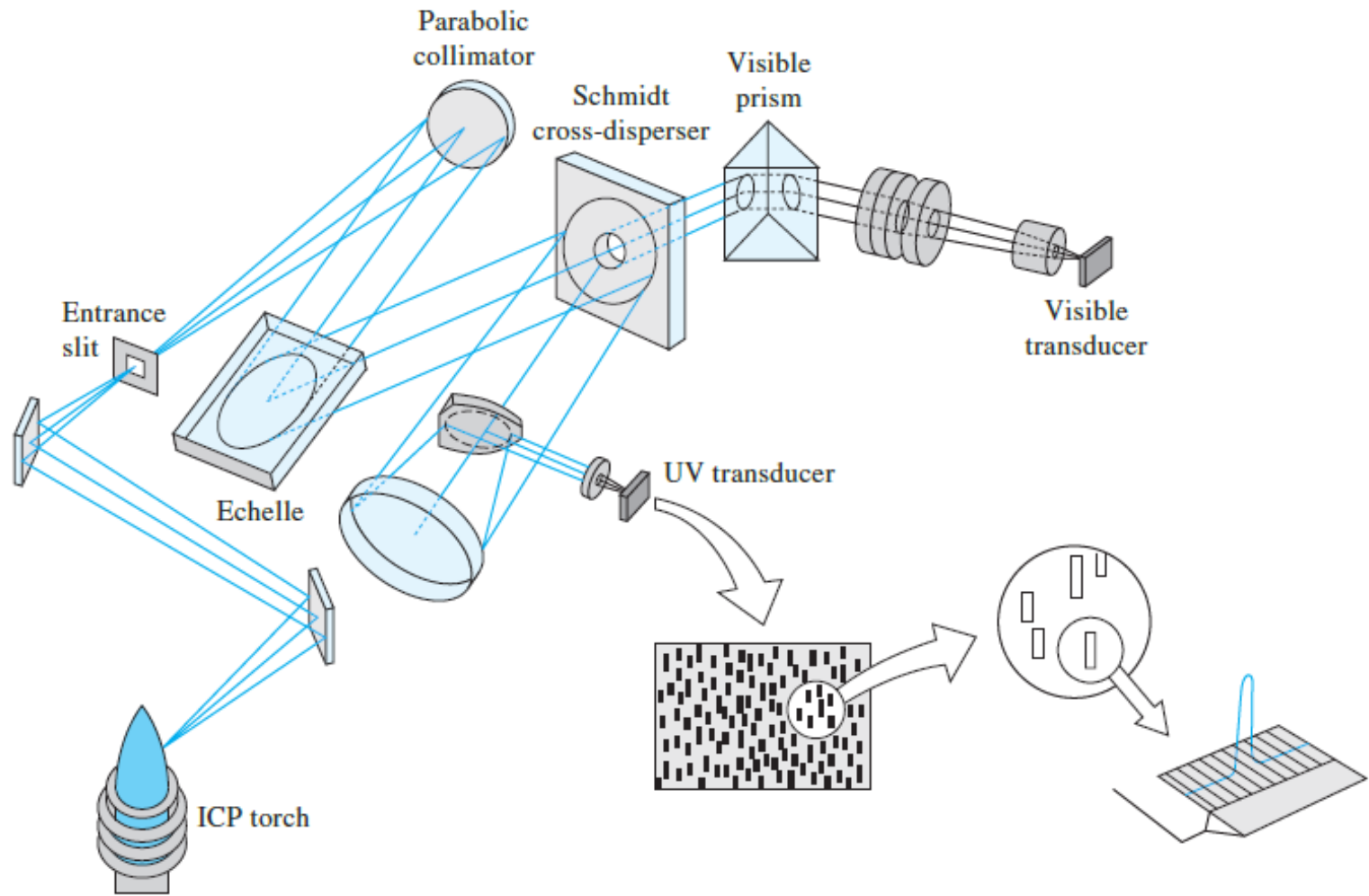


FIGURE 10-11 An echelle spectrometer with segmented array of CCDs. (From T. W. Barnard et al., *Anal. Chem.*, 1993, 65, 1231. Figure 1, p. 1232. Copyright 1993 American Chemical Society.)

ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ

- Οι φυσικές παρεμποδίσεις οφείλονται στις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες του πρότυπου διαλύματος και του δείγματος (ιξώδες, επιφανειακή τάση, πυκνότητα, συγκέντρωση διαλυμένων στερεών) και επηρεάζουν την εκνέφωση του δείγματος:
 - *Ταχύτητα μεταφορά μάζας δείγματος,*
 - *ιδιότητες εκνεφωτή,*
 - *αεροδυναμική του θαλάμου εκνέφωσης και*
 - *συνθήκες διέγερσης και εκπομπής στο πλάσμα (EIE)*
- Εξετάζονται αρχικά οι παράμετροι της εισαγωγής δείγματος και του πλάσματος (εκνεφωτής, θάλαμος εκνέφωσης, ισχύς, τύπος και ύψος παρατήρησης, κοκ) και βελτιστοποιούνται

ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ

❖ **Λύση:** να προσαρμόσω τη βαθμονόμηση στη μήτρα του δείγματος (**matrix matching**) → Αλλαγή των φυσικών ιδιοτήτων του διαλύματος (ιξώδες, επιφανειακή τάση, πυκνότητα)

- Άλατα ή οργανικοί διαλύτες
- Μεταβολή στην ταχύτητα εκνέφωσης και στη διάμετρο των σωματιδίων του αερολύματος.

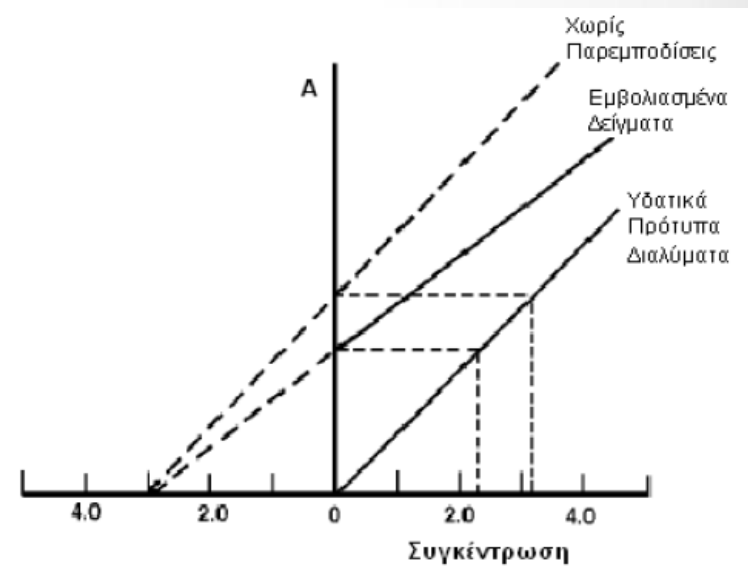
Κλίση καμπύλης αναφοράς σε προτύπα >> από αυτή των εμβολιασμένων δειγμάτων παρουσία μήτρας → ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΗ

✓ Προσαρμογή στη μήτρα του δείγματος ή αραιώση του δείγματος

✓ Μέθοδος σταθερών προσθηκών

✓ Μέθοδος Εσωτερικού Προτύπου

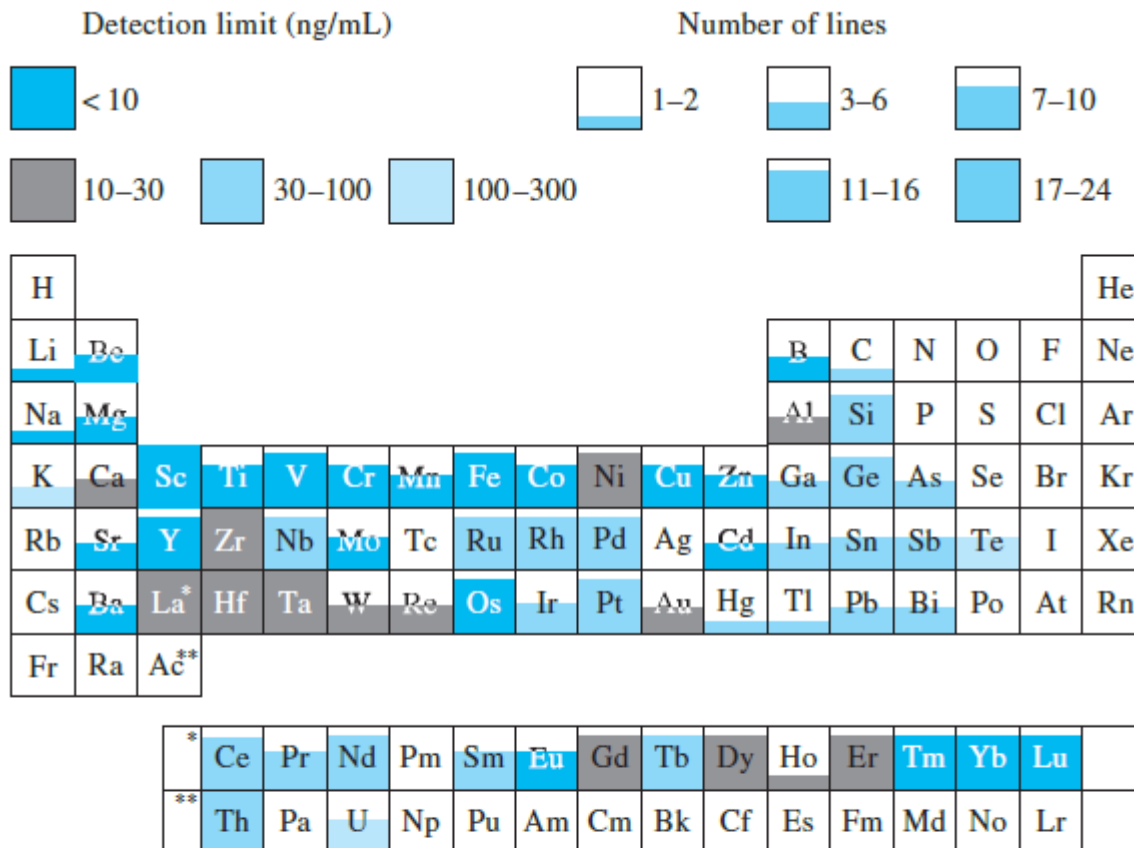
✓ Προσθήκη επιφανειοδραστικών



ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ

- **Άμεση επικάλυψη φασματικών γραμμών.** Διορθώνεται μόνο με λογισμικό διαστοιχειακών παρεμποδίσεων με χρήση χημειομετρίας (IECs)
- **Επικάλυψη φασματικής γραμμής από διευρυμένη πλευρική κορυφή (wing).** Διορθώνεται με καθορισμό δύο σημείων διόρθωσης υποβάθρου εκατέρωθεν της κορυφής.
- **Συνεχές φάσμα εκπομπής.** Αν παρουσιάζει συγκεκριμένη δομή (δομημένο υπόβαθρο, structured background) είναι δύσκολο να διορθωθεί και η διόρθωση γίνεται μόνο μέσω λογισμικού. Αν απλά μετατοπίζει τη γραμμή βάσης, τότε μπορεί να γίνει διόρθωση υποβάθρου με καθορισμό ενός σημείου μέτρησης του.
- **Παράσιτη ακτινοβολία.** Συνήθως αυξάνει απλά τη γραμμή βάσης και διορθώνεται εύκολα.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ICP-OES & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

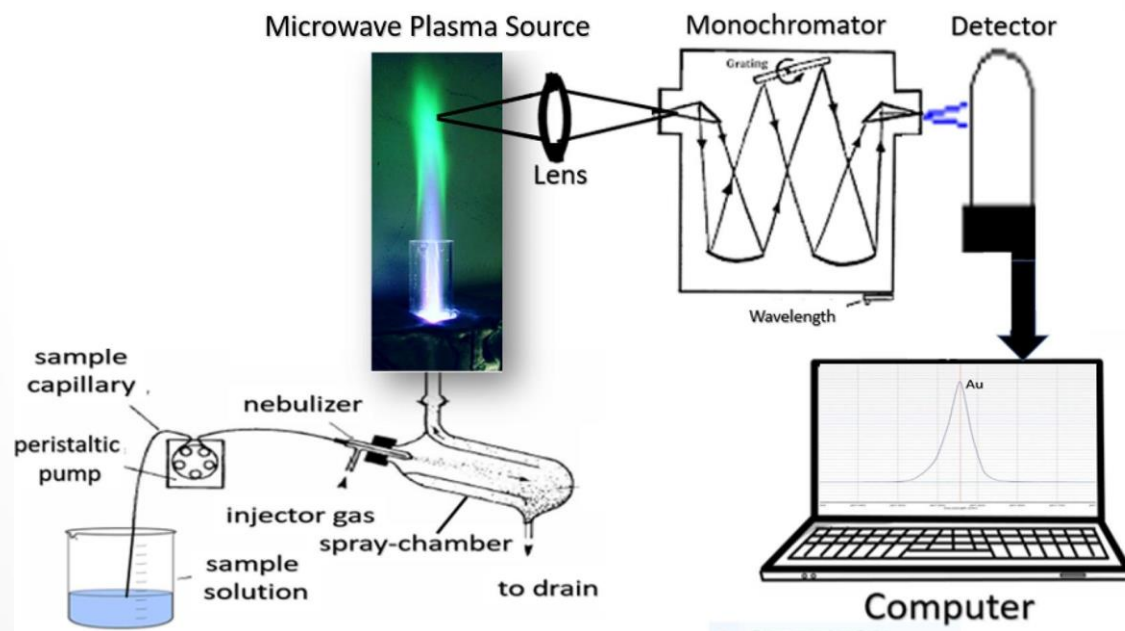


- Τρόφιμα
- Περιβάλλον
- Κλινική Χημεία
- Γεωχημεία
- Μέταλλα/Κράματα
- Πετρέλαιο/Λιπαντικά

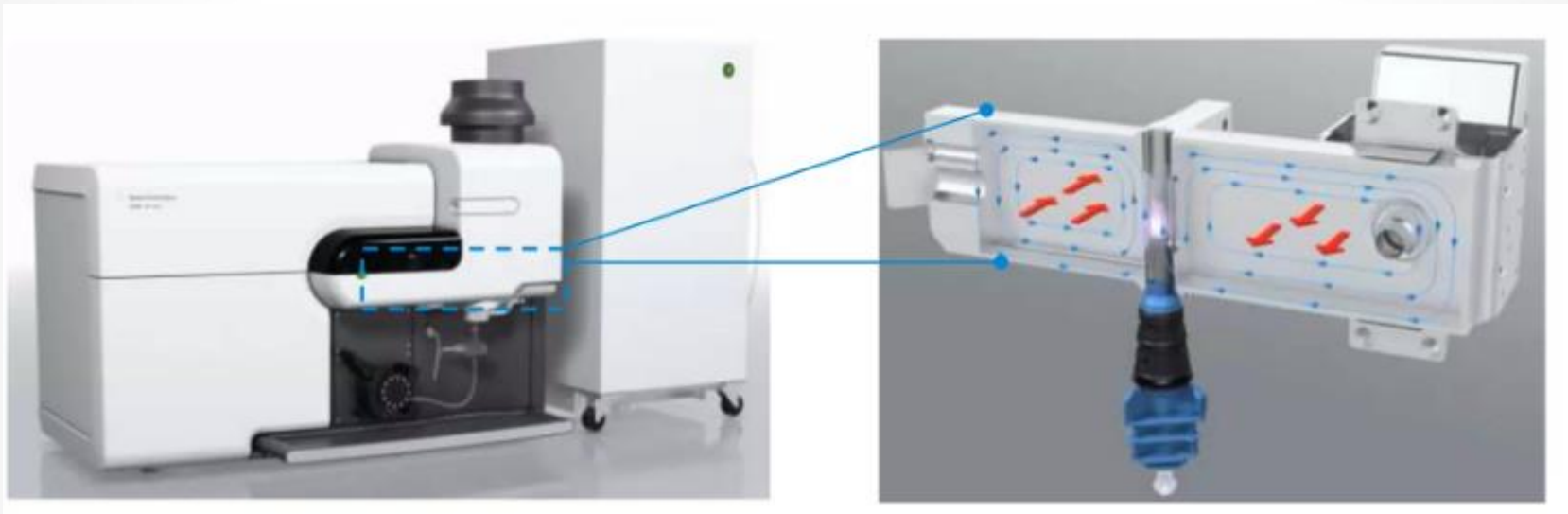
FIGURE 10-14 Periodic table characterizing the detection power and number of useful emission lines of ICP by using a pneumatic nebulizer. The color and degree of shading indicate the range of detection limits for the useful lines. The area of shading indicates the number of useful lines. (Adapted from *Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy*, Part 1, p. 143, P. W. J. M. Boumans, ed., New York: Wiley, 1987. With permission.)

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής με Μικροκυματικό Πλάσμα MP-AES

- Αποτελεί παραλλαγή του ICP-AES
- Πηγή πλάσματος επαγόμενη από μικροκύματα
- Αντί για τη χρήση Αργού, χρησιμοποιείται Άζωτο
- Η παραγωγή του Αζώτου γίνεται μέσω μιας γεννήτριας, μειώνοντας το κόστος ανάλυσης
- Η μέση θερμοκρασία του πλάσματος είναι από 10000 K στο Αργό, μειώνεται στους 5000 K
- Η πατέντα ανήκει ακόμη στην εταιρεία Agilent.

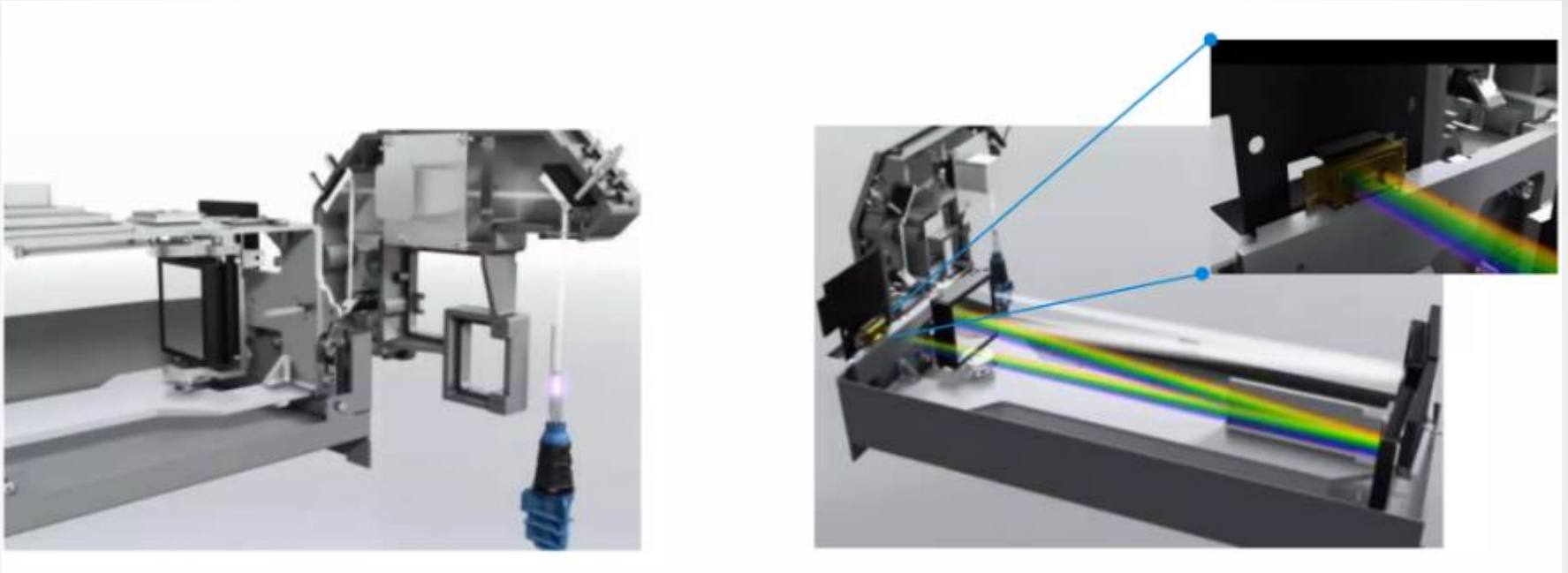


Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής με Μικροκυματικό Πλάσμα MP-AES



- Συσκευή magnetron που παράγει ακτινοβολία μικροκυμάτων όπως ο φούρνος μικροκυμάτων
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται μεταφέρεται σε ένα κυματοδηγό (μια κοίλη επιφάνεια)
- Η ενέργεια του στάσιμου κύματος (ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία)
- μεταφέρεται στο αέριο, που το σταθεροποιούν

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής με Μικροκυματικό Πλάσμα MP-AES



- Λόγω της χρήσης μικροκυμάτων επιτρέπεται μόνο αξονική διεύθυνση
- Υπάρχει ένα προοπτικό σύστημα που συγκεντρώνει την ακτινοβολία και την οδηγεί στον μονοχρωμάτορα
- Χρησιμοποιείται ένας μονοχρωμάτορας Czerny Turner (εστιακή απόσταση 600mm) και έναν ανιχνευτή CCD (Charge coupled device, συσκευή σύζευξης φορτίου) με ψύξη Peltier

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής με Μικροκυματικό Πλάσμα MP-AES

Πλεονεκτήματα

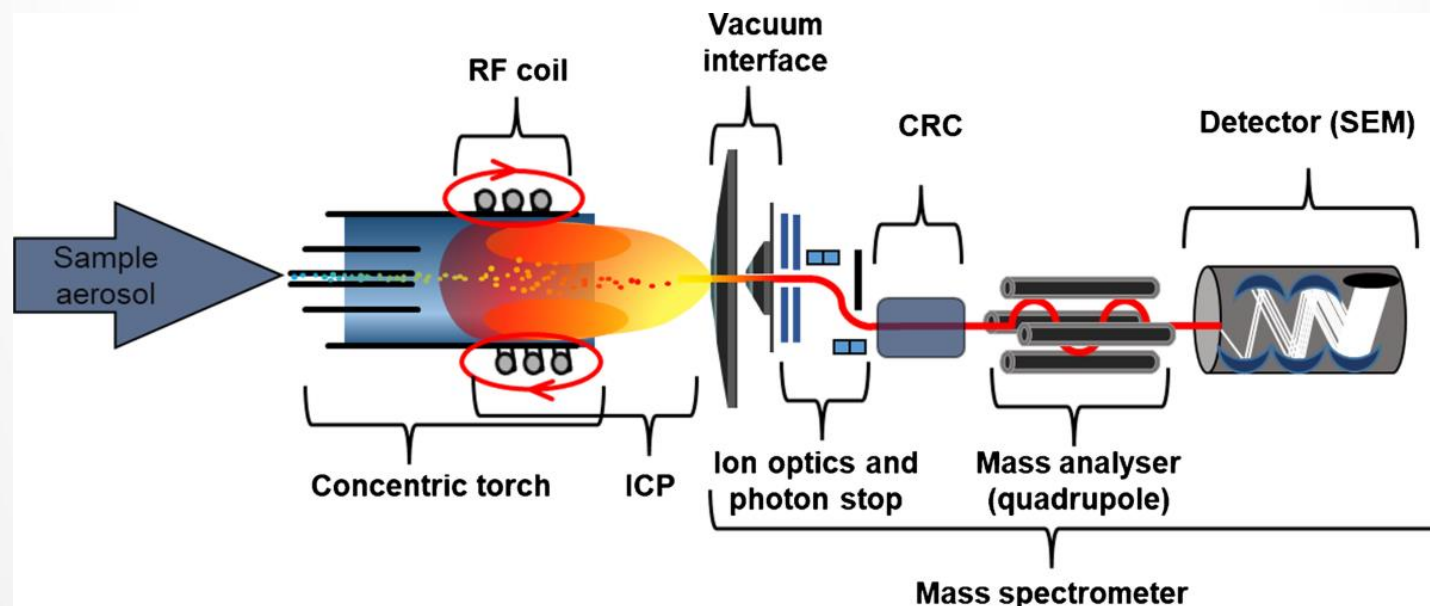
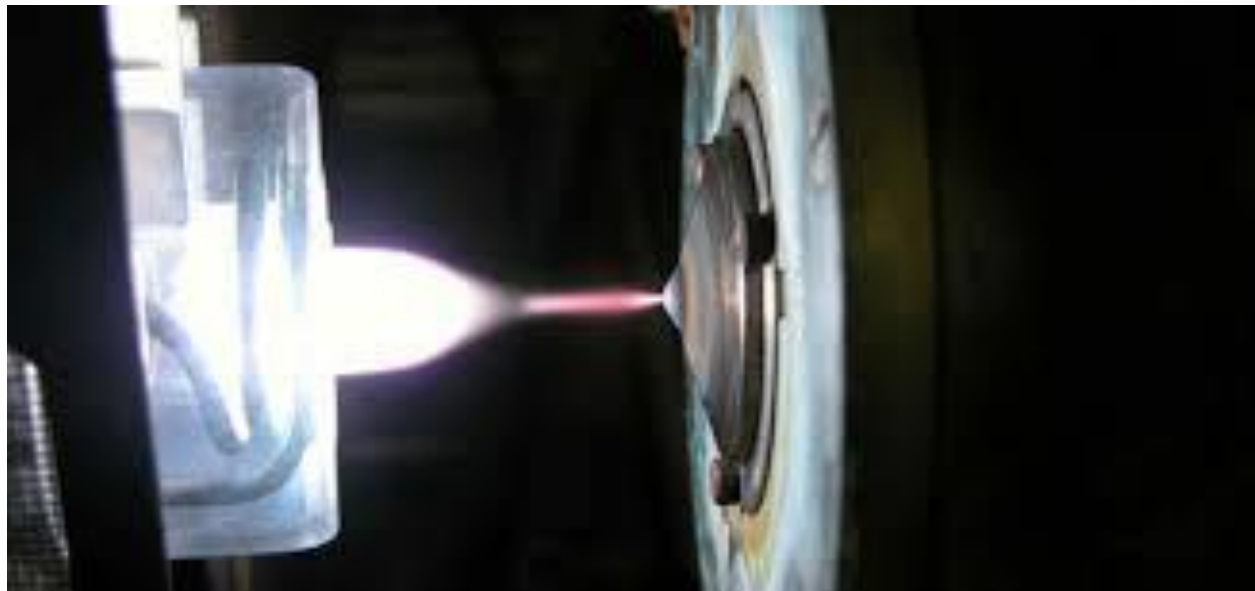
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας, καθώς χρησιμοποιεί άζωτο που εξάγεται από γεννήτρια αζώτου
- Απουσία εύφλεκτων και τοξικών αερίων (π.χ. ακετυλένιο, υποξείδιο του αζώτου)
- Εύκολος προσδιορισμός στοιχείων που σχηματίζουν καρβίδιο, καθώς η θερμοκρασία του πλάσματος είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία της φλόγας
- Χαμηλότερα όρια ανίχνευσης από την FAAS, που, συνήθως, συγκρίνονται με αυτά του ICP-OES
- Ευρύτερο φάσμα στοιχείων που μπορούν να προσδιοριστούν σε σύγκριση με το FAAS.
- Τα αποτελέσματα λαμβάνονται γρήγορα – δυνατότητα ανάλυσης πολλαπλών στοιχείων, διαδοχικά
- Λιγότερες φασματικές παρεμποδίσεις και πιο ευκρινείς ατομικές φασματικές γραμμές σε σύγκριση με το ICP-OES, λόγω του ψυχρότερου πλάσματος αζώτου (5000 K) σε σχέση με το πλάσμα αργού (8000-10000 K)
- Ταυτόχρονη διόρθωση υποβάθρου
- Δεν απαιτούνται λυχνίες για την ανάλυση
- Σύγχρονο λογισμικό
- Ιδανικό για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές, καθώς δεν απαιτούνται παροχές αερίου, όπως αργό, ακετυλένιο ή οξείδιο του αζώτου.

Φασματομετρία Ατομικής Εκπομπής με Μικροκυματικό Πλάσμα MP-AES

Μειονεκτήματα

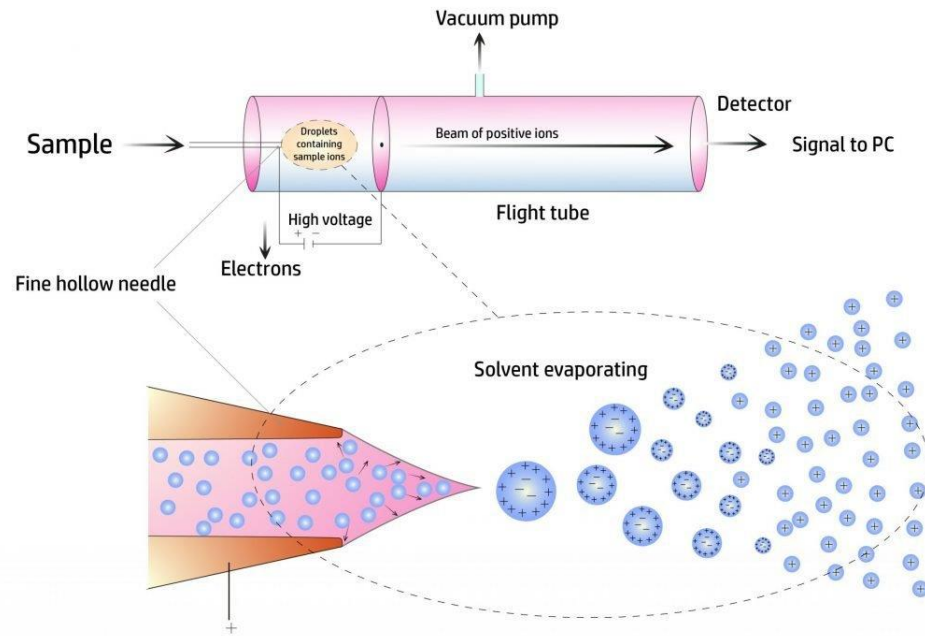
- Μεγαλύτερο αρχικό κόστος από FAAS
- Περισσότερες παρεμποδίσεις (συμπεριλαμβανομένων των φασματικών) από FAAS
- Υψηλότερα όρια ανίχνευσης από φούρνο γραφίτη Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry GFAAS ή το ICP MS
- Μικρότερη ταχύτητα ανάλυσης συγκριτικά με το ICP OES
- Δεν υπάρχει δυνατότητα προσδιορισμού ισοτόπων
- Απαίτηση για περιορισμό των ολικών διαλυμένων αλάτων TDS για να μην καταστραφεί ο πυρσός -περιορισμός στην αραίωση δειγμάτων, ώστε να μην μειωθεί υπερβολικά η συγκέντρωση του αναλύτη
- Απαιτείται προσοχή στο χειρισμό του πυρσού και των σωλήνων, μέσω των οποίων περνά το δείγμα, που επηρεάζουν τα αποτελέσματά της ανάλυσης

Φασματομετρία Ατομικής Μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού ICP-MS



ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΜΑΖΩΝ-ΟΡΙΣΜΟΣ

- Οικογένεια τεχνικών προσδιορισμού δομής και ποσοτικού προσδιορισμού ενώσεων και στοιχείων, οι οποίες βασίζονται στον ιοντισμό ατόμων ή μορίων ή την παραγωγή ιοντικών θραυσμάτων μορίων στην αέρια φάση και την καταγραφή της σχετικής έντασης του ιοντικού ρεύματος που αντιστοιχεί σε κάθε **λόγο μάζας-προς-φορτίο (m/z)**



ΑΤΟΜΙΚΗ & ΜΟΡΙΑΚΗ ΜΑΖΑ

➤ **Ενοποιημένη μονάδα ατομικών μαζών (u):** ίση προς το 1/12 της μάζας ενός ουδέτερου ατόμου ^{12}C

➤ Συνήθως αναφέρεται και ως ένα Dalton (Da)

$$1 \text{ u} = 1 \text{ Da} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg} / \text{άτομο } ^{12}\text{C}$$

➤ **Ατομική μάζα** ^{35}Cl : $2,91407 \times 12,0000 \text{ Da} = 34,9688 \text{ Da}$

➤ **Μοριακή μάζα** $^{12}\text{C}^1\text{H}_4$: $12,0000 \times 1 + 1,007825 \times 4 = 16,0313 \text{ Da}$

➤ Ονομαστική (**μονοϊσοτοπική**) **μάζα** (nominal mass)
Για το $^{12}\text{C}^1\text{H}_4$: 16 u

➤ **Μέση μάζα** (average mass): συνδυασμός των ακριβών μαζών των ισοτόπων (AB) ή των μέσων ατομικών μαζών (MB)

ΛΟΓΟΣ ΜΑΖΑ-ΠΡΟΣ-ΦΟΡΤΙΟ

- Ο **λόγος μάζα-προς φορτίο (m/z)** ενός ατομικού ή μοριακού ιόντος

Είναι ο λόγος χωρίς μονάδες του μαζικού αριθμού και του αριθμού των θεμελιωδών φορτίων z του ιόντος

- ✓ Λαμβάνεται με διαίρεση της ατομικής ή μοριακής μάζας ενός ιόντος (m) με τον αριθμό (z) των φορτίων που φέρει

$$^{12}\text{C}^1\text{H}_4^+ \quad m/z = 16,032 / 1 = 16,032$$

$$^{12}\text{C}^1\text{H}_4^{2+} \quad m/z = 16,0313 / 2 = 8,0156$$

(*χωρίς μονάδες)

ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΚΟΡΥΦΕΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 20-3 Φυσική αφθονία ισοτόπων μερικών συνηθισμένων στοιχείων

Στοιχείο ^α	αφθονότερο ισότοπο	Αφθονία άλλων ισοτόπων σε σχέση με 100 μέρη του αφθονότερου ^β
Υδρογόνο	¹ H	² H 0,015
Άνθρακας	¹² C	¹³ C 1,08
Άζωτο	¹⁴ N	¹⁵ N 0,37
Οξυγόνο	¹⁶ O	¹⁷ O 0,04 ¹⁸ O 0,20
Θείο	³² S	³³ S 0,80 ³⁴ S 4,40
Χλώριο	³⁵ Cl	³⁷ Cl 32,5
Βρόμιο	⁷⁹ Br	⁸¹ Br 98,0
Πυρίτιο	²⁸ Si	²⁹ Si 5,1 ³⁰ Si 3,4

^α Τα φθόριο (¹⁹F), φωσφόρος (³¹P), νάτριο (²³Na) και ιώδιο (¹²⁷I) δεν διαθέτουν άλλα φυσικά ισότοπα.

^β Οι αριθμοί δείχνουν το μέσο όρο του πλήθους των ισοτόπων ατόμων που υπάρχουν ανά 100 άτομα του αφθονότερου ισοτόπου. Δηλαδή για κάθε 100 άτομα ¹²C θα υπάρχουν κατά μέσο όρο 1,08 άτομα ¹³C.

Στη φύση υπάρχουν τρεις κατηγορίες στοιχείων:

- **“A” στοιχεία**—Μόνο ένα φυσικό ισότοπο υπάρχει (πχ F)
- **“A+1” στοιχεία** —Δύο φυσικά ισότοπα υπάρχουν τα οποία διαφέρουν κατά 1 Da (πχ C)
- **“A+2” στοιχεία**—Δύο φυσικά ισότοπα υπάρχουν τα οποία διαφέρουν κατά 2 Da (πχ Cl)

ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ- RESOLVING POWER (R)

Διακριτική ικανότητα φασματομέτρου μαζών:

$$R = m/\Delta m$$

□ Η ικανότητα ενός φασματομέτρου μαζών να διαχωρίζει μάζες

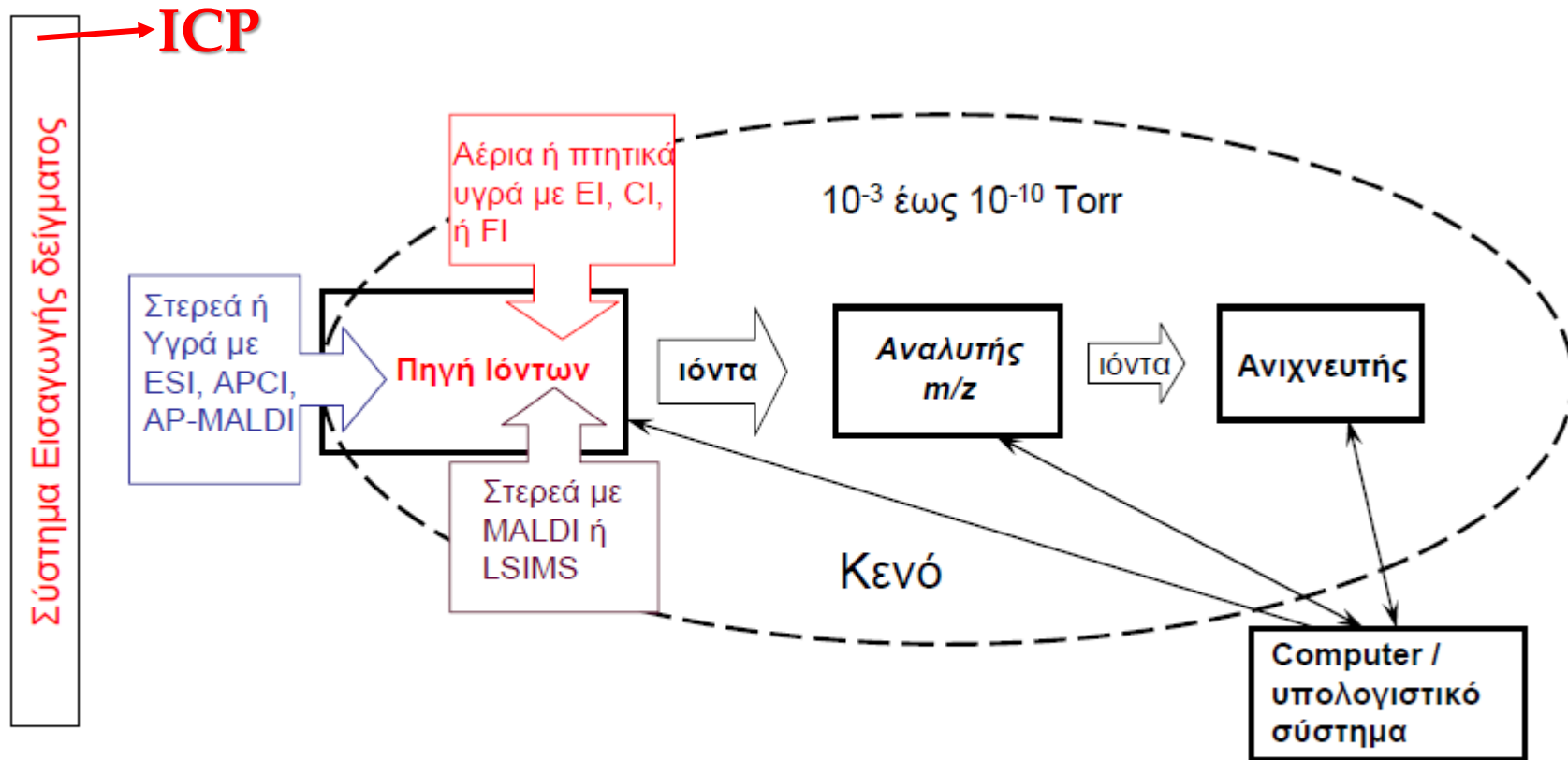
▪ m : η τιμή της μάζας της πρώτης κορυφής

▪ Δm : η διαφορά μαζών μεταξύ δύο μόλις διαχωριζόμενων κορυφών

$$\begin{array}{l} \text{N}_2^+ : 28,0061 \\ \text{CO}^+ : 27,9949 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{N}_2^+ \\ \text{CO}^+ \end{array}} \right\} \Delta m = 28,0061 - 27,9949 = \\ = 0,0112$$

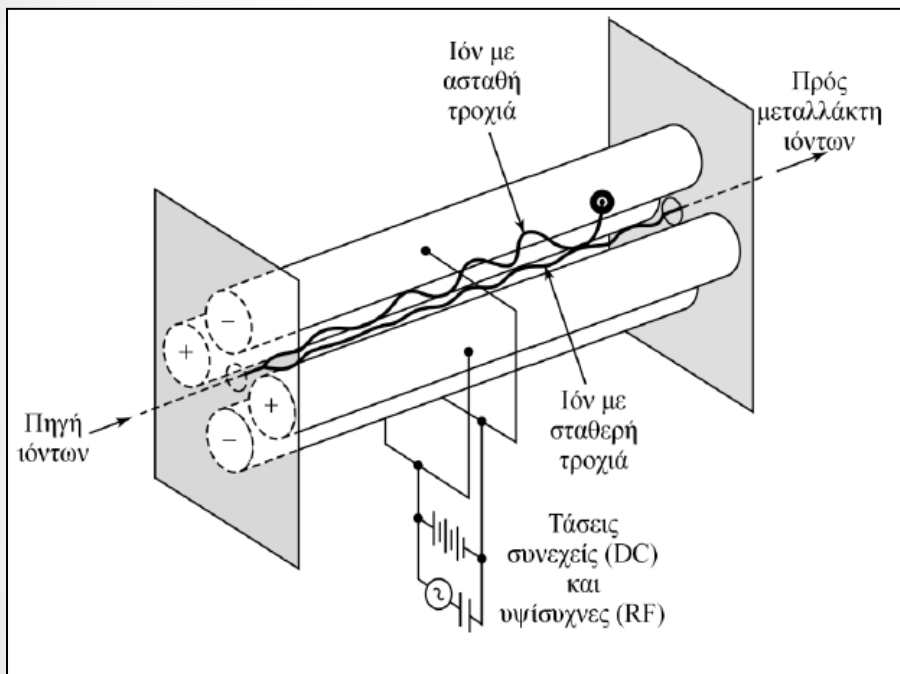
$$\text{Άρα: } R = m/\Delta m = 27,9949/0,0112 = 2500$$

ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΟ ΜΑΖΑΣ



Στο τμήμα αυτό λαμβάνει χώρα ο ιοντισμός του δείγματος

Τετραπολικός αναλυτής μαζών (Quadrupole Mass Analyser, Q)



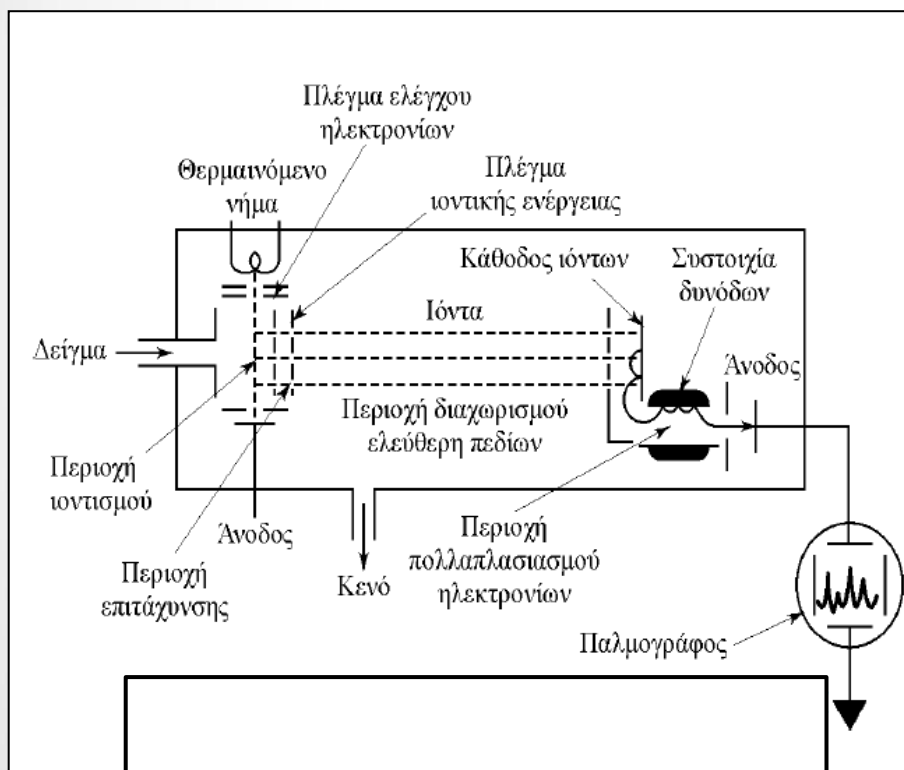
➤ «φίλτρο μαζών»

- Αποτελείται από τέσσερις, παράλληλες μεταξύ τους, κυλινδρικές, μεταλλικές ράβδους που λειτουργούν σαν ηλεκτρόδια
- ανά δύο, σε διαγώνια διάταξη να σχηματίζουν ζευγάρι και να συνδέονται το ένα ζεύγος με τον θετικό πόλο μια πηγής συνεχούς ρεύματος και το δεύτερο ζεύγος με τον αρνητικό πόλο
- σε κάθε ζευγάρι ράβδων εφαρμόζονται εναλλασσόμενες τάσεις που διαφέρουν μεταξύ τους κατά 180°
- Μια πηγή του εναλλασσόμενου ρεύματος & μια ακόμη πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος με τάση πόλων από 5 έως 10 Volt
- Τα ιόντα εκείνα που αντιστοιχούν στο δυναμικό που εφαρμόζεται θα διαπεράσουν και θα εξέλθουν από το τετράπολο προς τον ανιχνευτή διαγράφοντας ελικοειδείς τροχιές. Όλα τα υπόλοιπα ιόντα θα ακολουθήσουν παλλόμενη διαδρομή με αποτέλεσμα να προσκρουθούν στις ράβδους, να εκφορτιστούν και να ην ανιχνευθούν.

Αναλυτής χρόνου πτήσης (Time of Flight, TOF)

- ❑ Σωλήνας πορείας ή «πτήσης»:
- ❑ Τα ιόντα διαχωρίζονται λόγω διαφορετικών ταχυτήτων

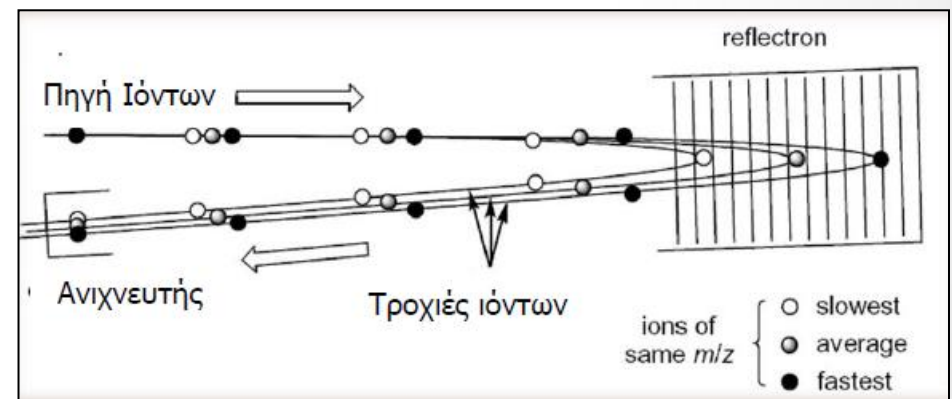
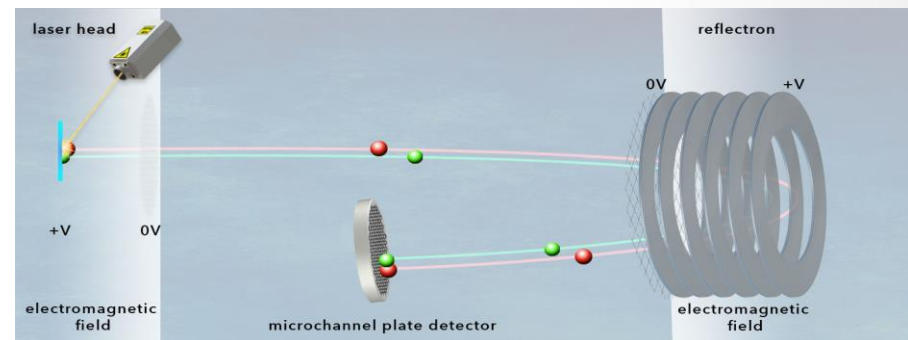
- ο διαχωρισμός βασίζεται στην κινητική ενέργεια και την ταχύτητα των ιόντων
- παραγόμενα ιόντα επιταχύνονται από ηλεκτρικό πεδίο,
- τα ιόντα περνούν μέσα μια διάταξη εστίασης και μετά εισέρχονται σε ένα ευθύγραμμο σωλήνα (**θάλαμος πτήσης**), μήκους d (περίπου 1m), όπου δεν υπάρχει ούτε ηλεκτρικό ούτε μαγνητικό πεδίο.
- Τα ιόντα επιταχύνθηκαν από το ίδιο πεδίο V , οπότε αν έχουν το ίδιο φορτίο θα έχουν αποκτήσει και την ίδια κινητική ενέργεια K
- ελαφρύτερα ιόντα θα κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες από τα βαρύτερα, και θα χρειάζονται μικρότερο χρονικό διάστημα για να διασχίσουν τον θάλαμο πτήσης όπου θεωρούμε ότι κάνουν ευθύγραμμη ομαλή κίνηση



$$K = qV = zeV = \frac{1}{2}mu^2 \Rightarrow eV = \frac{1}{2} \frac{m}{z} u^2 = E$$

Αναλυτής χρόνου πτήσης (Time of Flight, TOF)

- ❖ παρατηρείται διασπορά των τιμών της κινητικής ενέργειας των ιόντων.
- Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται μικρές διαφορές στους χρόνους πτήσης ιόντων με ίδιο λόγο m/z .
- Γεγονός που οδηγεί στη διεύρυνση των κορυφών του φάσματος και μείωση της διαχωριστικής ικανότητας του αναλυτή.
- ❖ Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη χρήση κατόπτρου ιόντων-ανακλαστήρα.
- Τα ταχύτερα ιόντα καθυστερούν μέσα στον ανακλαστήρα, γιατί εισέρχονται βαθύτερα μέσα σε αυτόν και κινούνται για μεγαλύτερη διαδρομή. Με αυτόν τον τρόπο τα βραδύτερα ιόντα, αλλά με ίδιο λόγο m/z , καταφέρνουν να τα προφτάσουν.



Φασματομετρία Ατομικής Μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού ICP-MS

Η ανάλυση με φασματομετρία ατομικών μαζών περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1) Ατομοποίηση

2) Ιοντισμός, παράγοντας δέσμη μονοφορτισμένων θετικών ιόντων

3) Διαχωρισμός των ιόντων με βάση το λόγο m/z

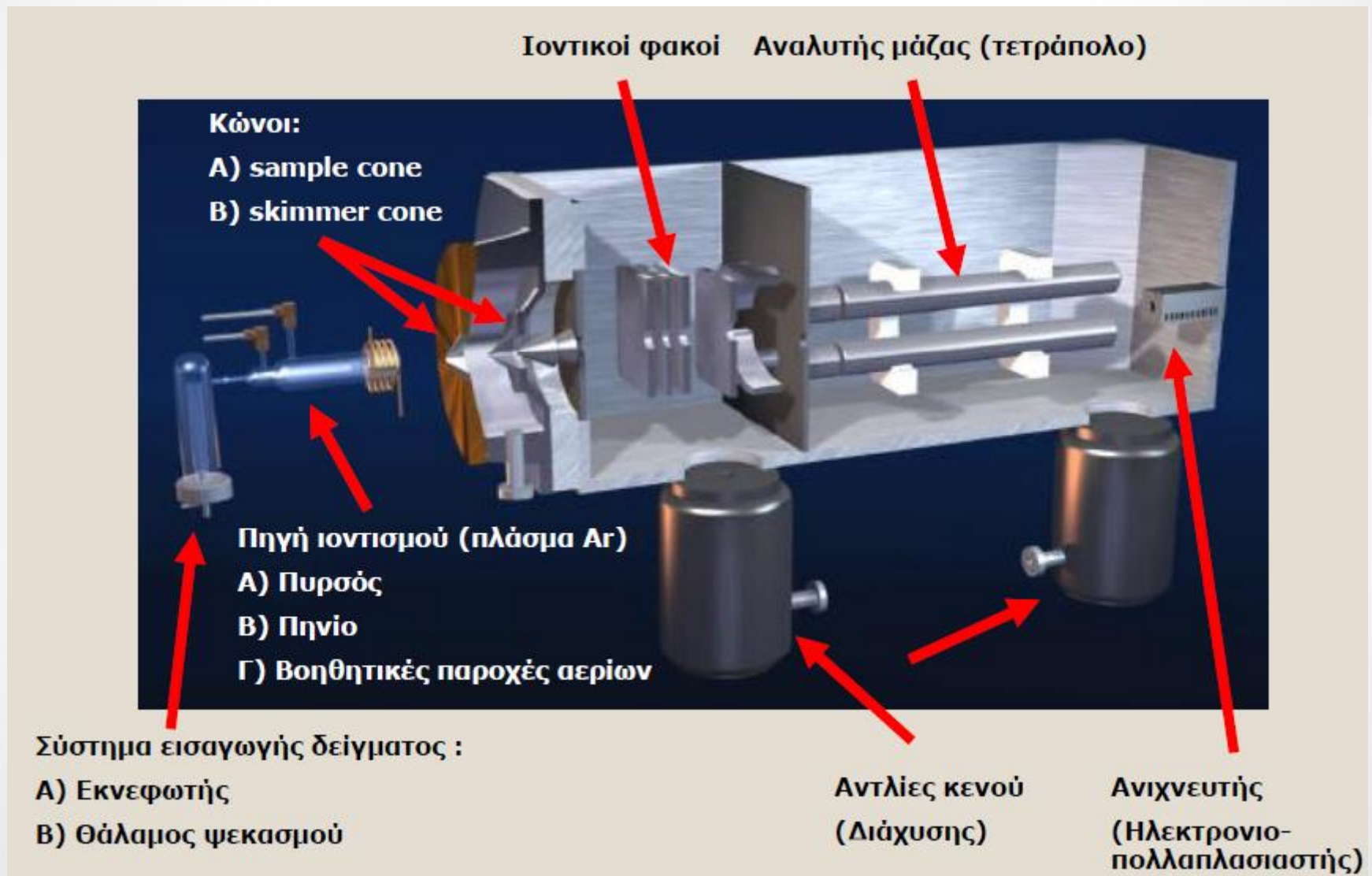
4) Απαρίθμηση ιόντων ή μέτρηση του ρεύματος κατάλληλου μεταλλάκτη

} ICP

} MS

Συζευγμένη τεχνική : ICP-MS

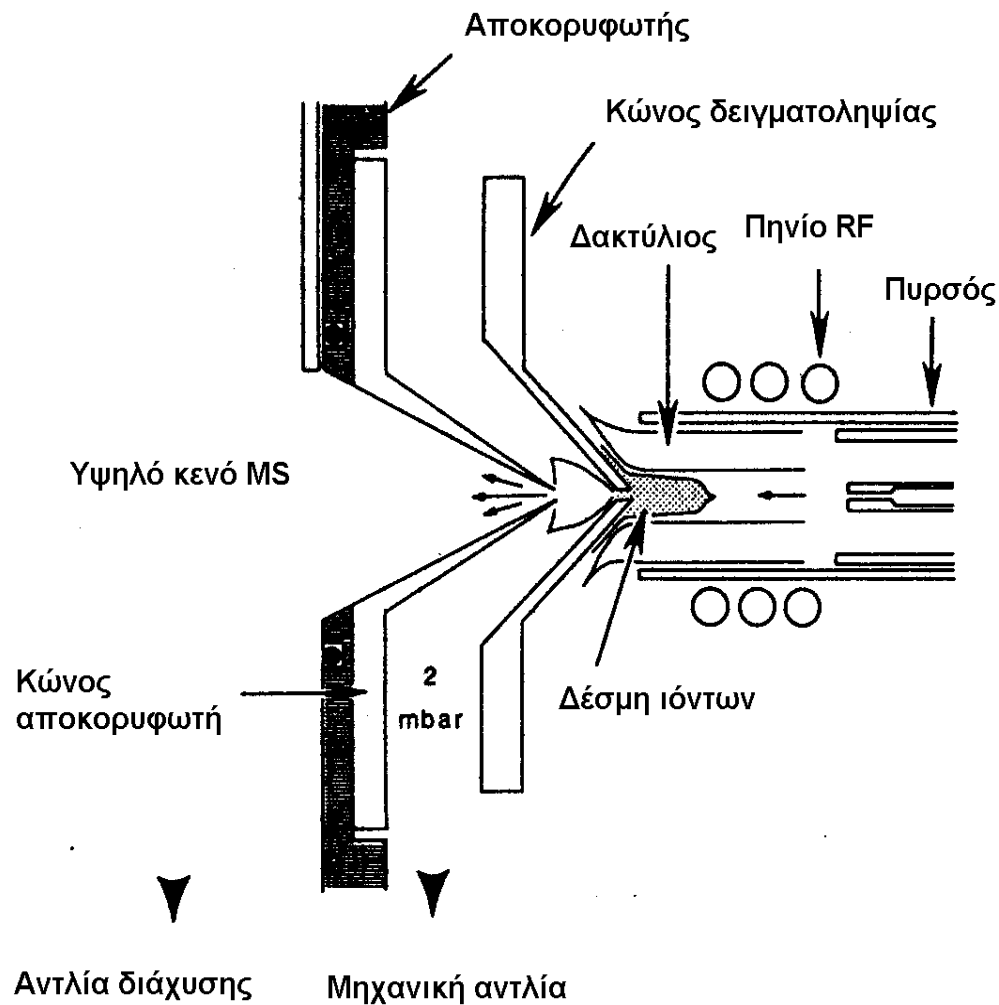
Φασματομετρία Ατομικής Μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού ICP-MS



Φασματομετρία Ατομικής Μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού ICP-MS

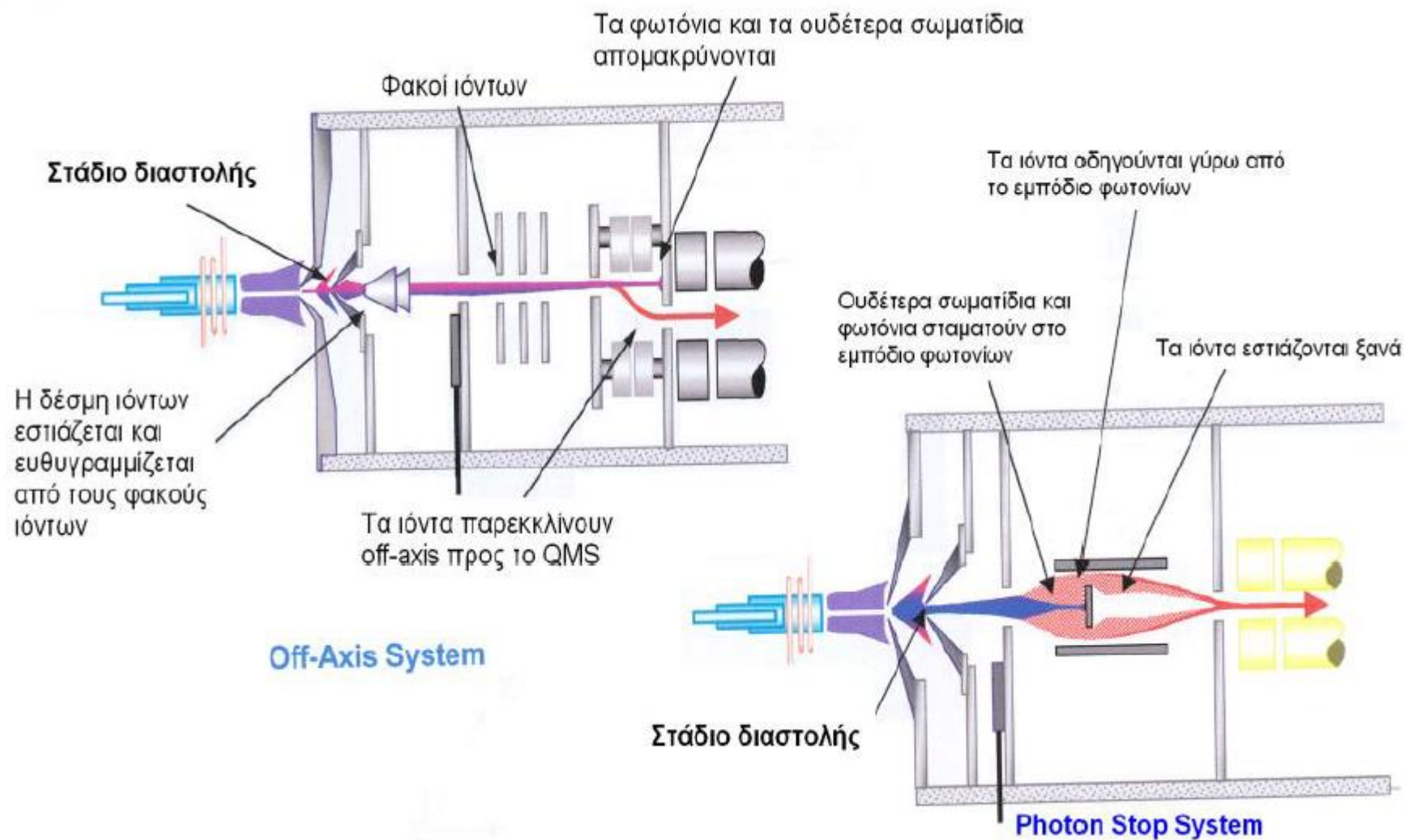
Στάδιο διαστολής:

Διασύνδεση ICP (ατμ. Πίεση) με QMS (υπό κενό)



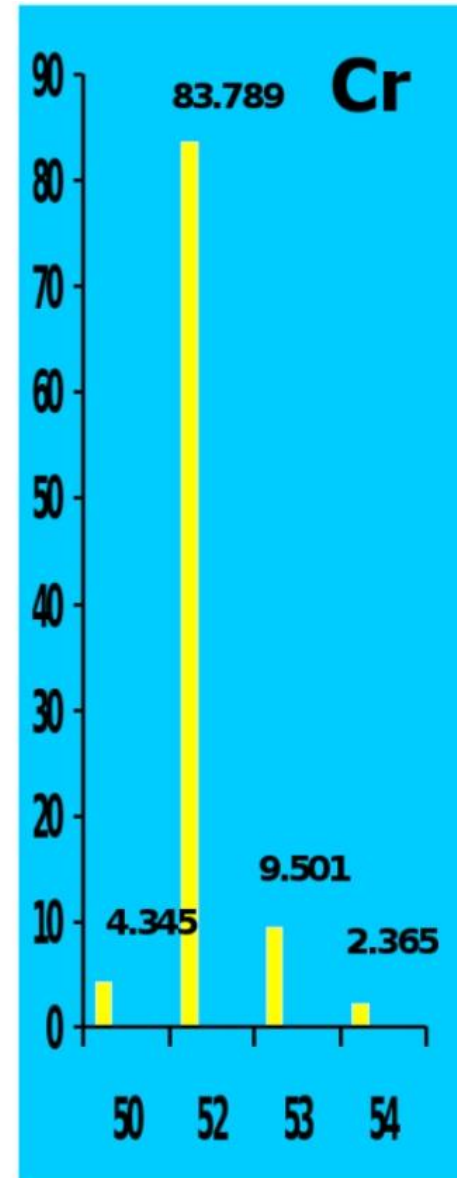
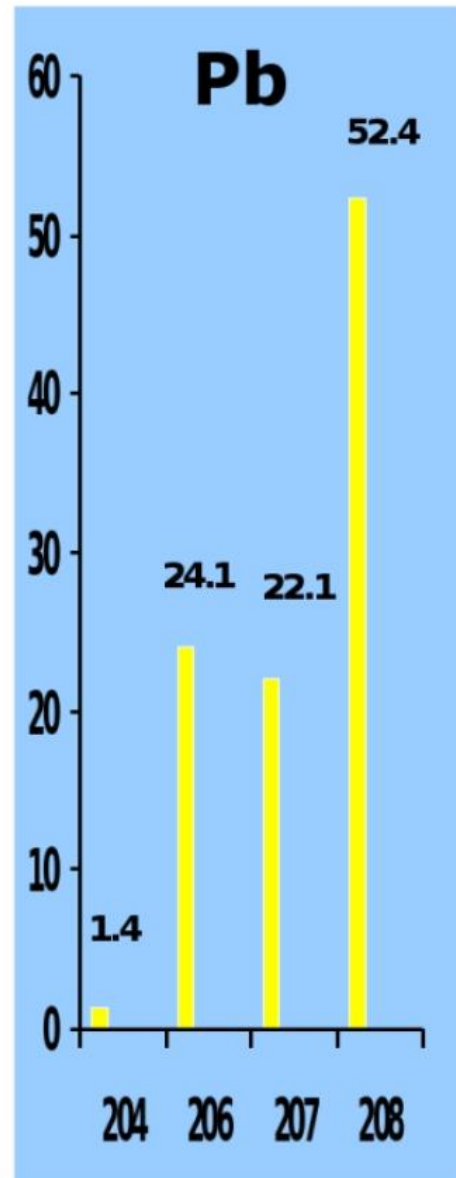
- Κώνος δειγματοληψίας: Ni ή Pt
- Λόγω διαστολής το αέριο ψύχεται
- Ένα τμήμα αερίου από τον αποκορυφωτή μεταφέρεται στους φακούς ιόντων.
- Τα θετικά ιόντα διαχωρίζονται από τα e^- , τα φωτόνια και τα ουδέτερα σωματίδια με εφαρμογή αρνητικού δυναμικού

Φασματομετρία Ατομικής Μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού ICP-MS



Φασματομετρία Ατομικής Μάζας σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού ICP-MS

- Πολύ απλά φάσματα μάζας-ραβδογράμματα
- ΚΟΡΥΦΕΣ-ΙΣΟΤΟΠΑ



Φασματικές Παρεμποδίσεις ICP-MS

Φασματικές παρεμποδίσεις: isobaric, oxides, doubly charged, polyatomic

Ισοβαρικές παρεμποδίσεις: $^{40}\text{Ar}^+$ στο $^{40}\text{Ca}^+$, $^{82}\text{Kr}^+$ στο $^{82}\text{Se}^+$

Παρεμποδίσεις πολυατομικών ιόντων: $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$ στο $^{56}\text{Fe}^+$

Μάζα	Πολυατομικό ιόν	Οξύ			Αναλύτης
		HNO_3	HCl	H_2SO_4	
51	ClO^+	0.12	12.0	0.84	V
52	ArC^+ , ArO^+	0.53	1.2	0.71	Cr
53	ClO^+	0.79	43.8	1.75	Cr
54	ArN^+	90.9	108	85.9	Fe, Cr
55	ArNH^+	0.71	0.56	0.84	Mn
56	ArO^+	18.0	15.8	15.1	Fe
57	ArOH^+	29.3	28.4	30.6	Fe
64	SO_2^+	1.26	1.21	480	Zn
66	SO_2^+	0.74	0.52	41.6	Zn
67	SO_2H^+	2.35	2.06	12.9	Zn
75	ArCl^+	0.19	2.1	0.46	As
80	Ar_2^+	1221	1257	1319	Se

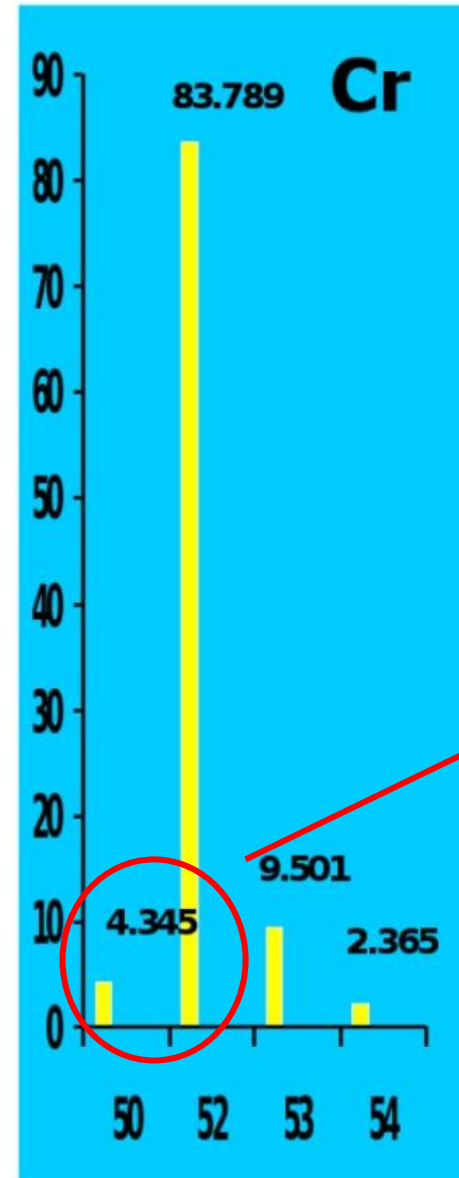
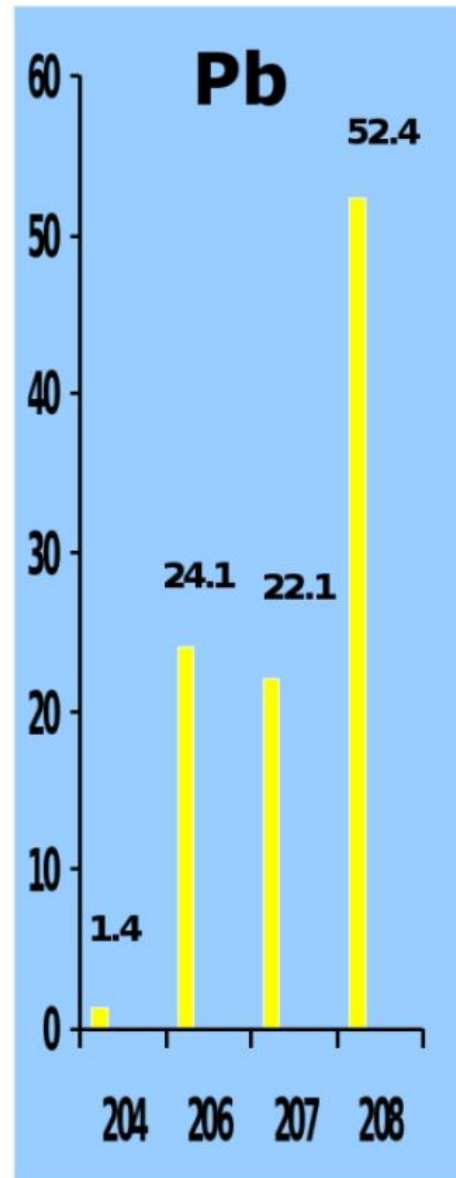
Παρεμποδίσεις από οξείδια και υδροξείδια: $^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}^+$ στο $^{56}\text{Fe}^+$

Παρεμποδίσεις από διφορτισμένα ιόντα:

$^{138}\text{Ba}^{++}$ στο m/z 69 (π.χ. $^{69}\text{Ga}^+$)

As ΜΟΝΟΙΣΟΤΟΠΙΚΟ!!

Φασματικές Παρεμποδίσεις ICP-MS



Χαμηλότερο
σήμα-προς-
θορυβο

Μοριακές Ισοβαρικές Παρεμποδίσεις

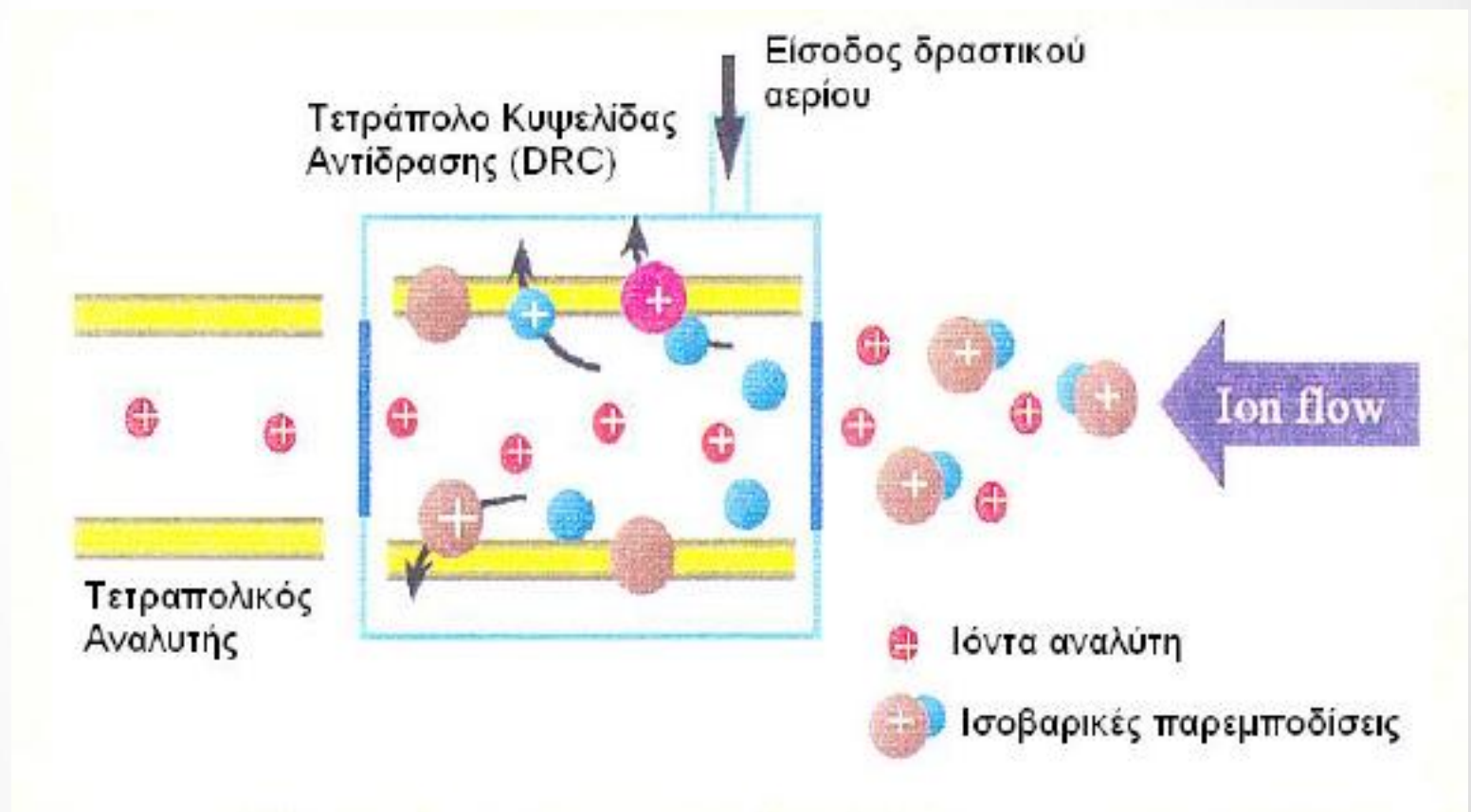
**Λόγω
διαλυτών
που
προσθέτω**

Μοριακό Ιόν	Αφθονία (%)	Ισότοπο αναλύτη	Αφθονία (%)
$^{35}_{16}\text{ClO}$	75.3	^{51}V	99.76
$^{35}_{17}\text{ClO}$	0.03	^{52}Cr	83.76
$^{35}_{18}\text{ClO}$	0.15	^{53}Cr	9.55
$^{35}_{16,1}\text{ClOH}$	75.3	^{52}Cr	
$^{35}_{17,1}\text{ClOH}$	0.03	^{53}Cr	
$^{35}_{18,1}\text{ClOH}$	0.15	^{54}Fe	5.82
		^{54}Cr	2.38
$^{37}_{16}\text{ClO}$	24.4	^{53}Cr	
$^{37}_{17}\text{ClO}$	0.01	^{54}Fe	
		^{54}Cr	

ΑΡΣΗ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΩΝ

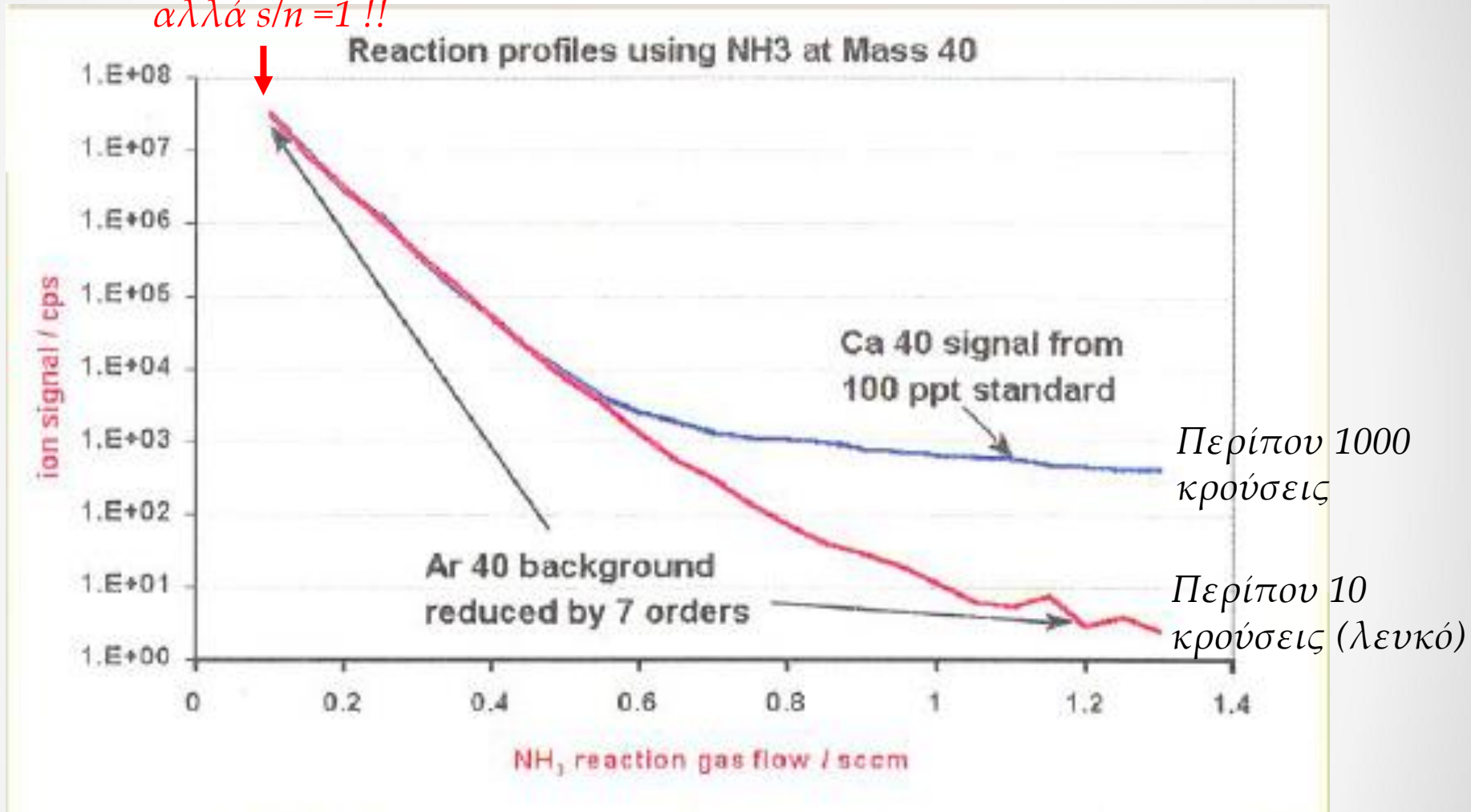
- Πριν το τετραπολο προσθετω μια κυψελίδα αντιδράσεων ή συγκρούσεων

Δραστικά αέρια
 NH_3 , CH_4 ,
 H_2 , αλλά και το He ,
αντιδρούν / συγκρούονται
με τα πολυατομικά ιόντα.



ΑΡΣΗ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΩΝ

Μεγάλο σήμα
αλλά $s/n = 1$!!



Άρση παρεμπόδισης ⁴⁰Ar
στο ⁴⁰Ca με NH₃:

Μείωση σήματος, αλλά
βελτίωση λόγου S/N

Ποσοτικές και ημιποσοτικές εφαρμογές της τεχνικής ICP-MS

- ✓ Πολυστοιχειακή ποσοτική ανάλυση :
73 στοιχεία (> 75% του Περιοδικού Πίνακα) Καμπύλες ταυτόχρονης βαθμονόμησης για ιχνοστοιχεία και κύρια στοιχεία
- ✓ Ταχύτατη ημιποσοτική ανάλυση
- ✓ Ισοτοπική ανάλυση
- ✓ Τεχνική ισοτοπικής αραιώσης: υψηλή ακρίβεια και ανθεκτικότητα
- **Οικονομικά ασύμφορη** για ανάλυση ενός μόνο στοιχείου ανά δείγμα (εκτός από ισοτοπική ανάλυση ή ανάλυση σπανίων γαιών)

Πλεονεκτήματα της τεχνικής ICP-MS (σε σχέση με όλες τις άλλες τεχνικές)

Το ICP-MS παρέχει:

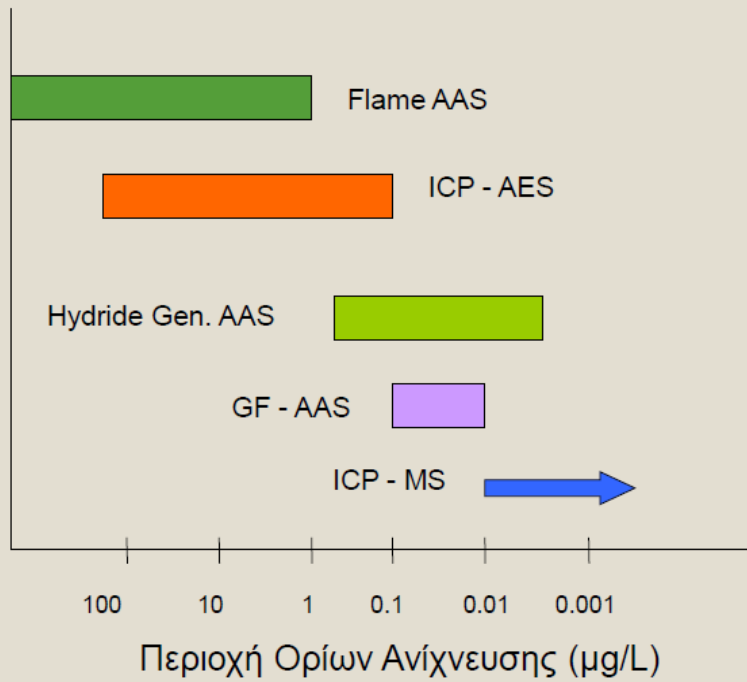
- ✓ Τα χαμηλότερα όρια ανίχνευσης ($< \text{ppt}$)
- ✓ Τη μεγαλύτερη ταχύτητα: 150 δείγματα x 72 στοιχεία/ 8 ώρες = 10800 αναλύσεις ανά 8h
- ✓ Αποκλειστική δυνατότητα ισοτοπικής ανάλυσης
- ✓ Ανάλυση σπανίων γαιών
- ✓ Μηδενικές χημικές παρεμποδίσεις
- ✓ Τη μεγαλύτερη δυναμική περιοχή (8-9 τάξεις μεγέθους)

Μειονέκτημα:

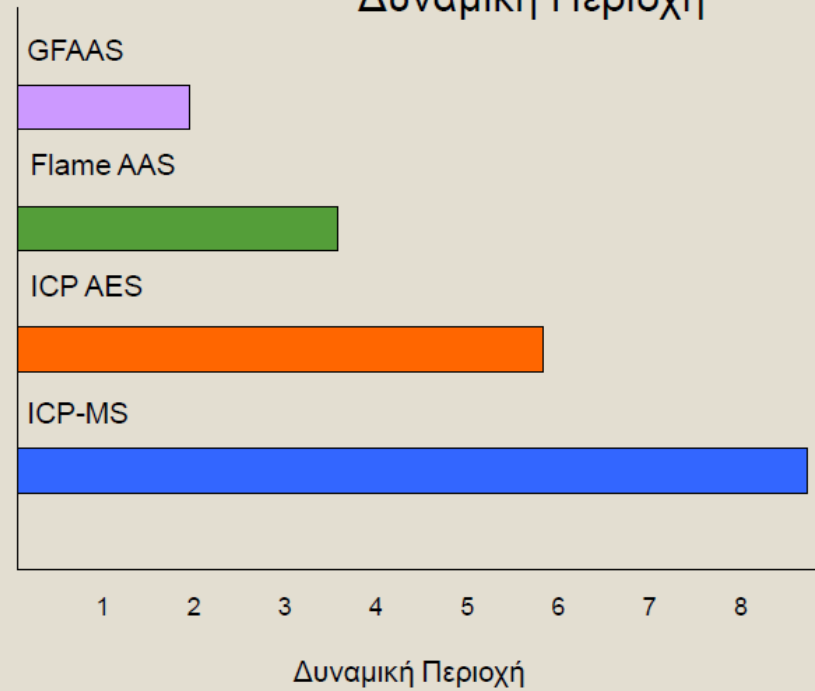
Υψηλό κόστος λειτουργίας, εκτός αν εκτελούνται πολλοί προσδιορισμοί

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

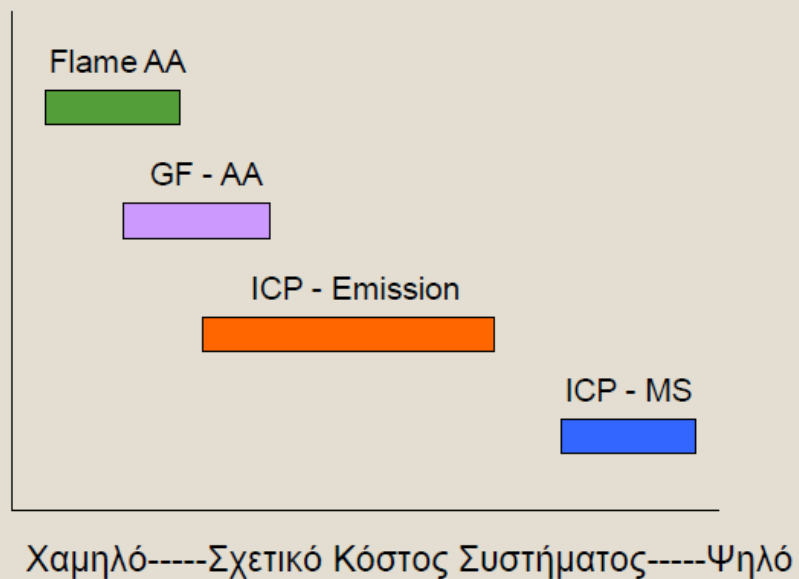
Όρια Ανίχνευσης



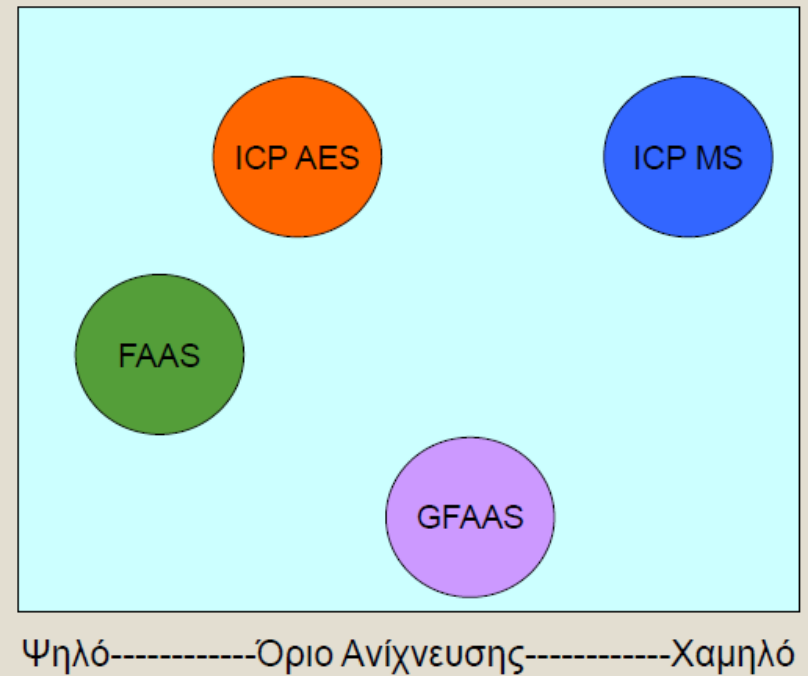
Δυναμική Περιοχή



Κόστος



Μικρή-----Ταχύτητα-----Μεγάλη



ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Flame AAS:

- Υψηλή εκλεκτικότητα
- Ευκολία χειρισμού
- Χαμηλού κόστους
- RSDs 0.3-1%
- Μόνο υγρά δ/τα

ICP AES:

- Υψηλή θερμοκρασία πλάσματος, προσδιορισμός «δύσκολων» στοιχείων
- Πολυστοιχειακή
- Μεγάλη δυναμική περιοχή
- RSDs 0.5-2%
- Ασφαλής, ταχεία και εύκολη ανάλυση
- Φασματικές παρεμποδίσεις

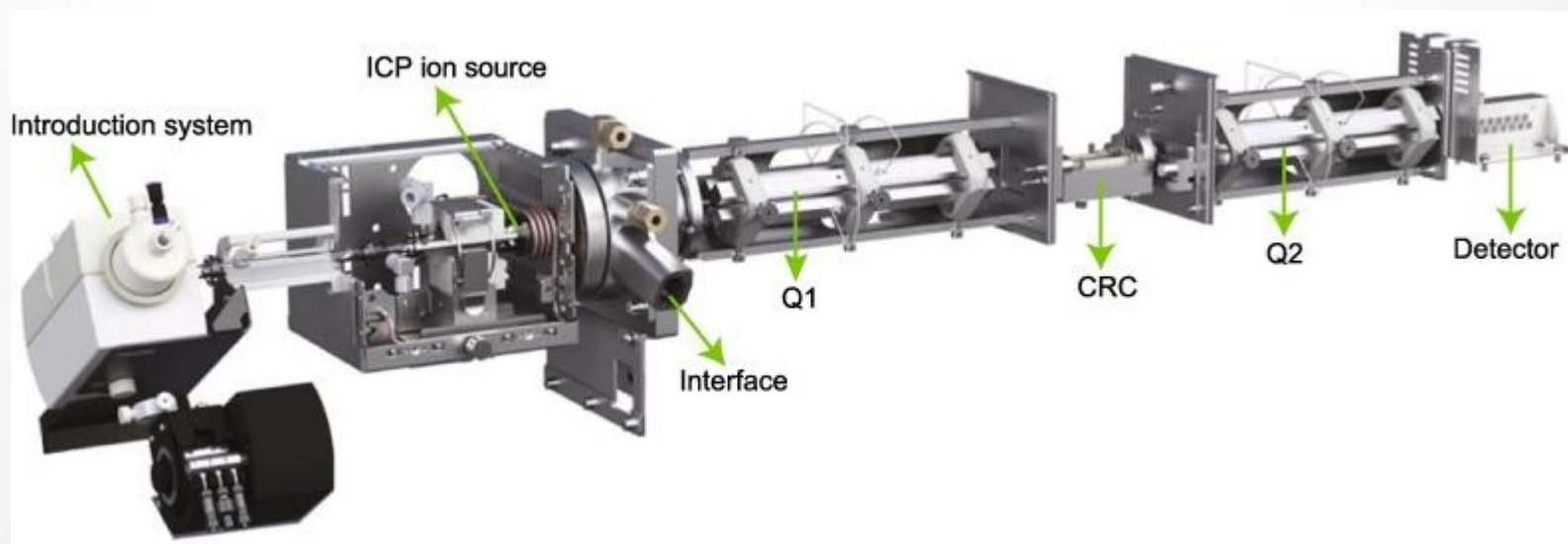
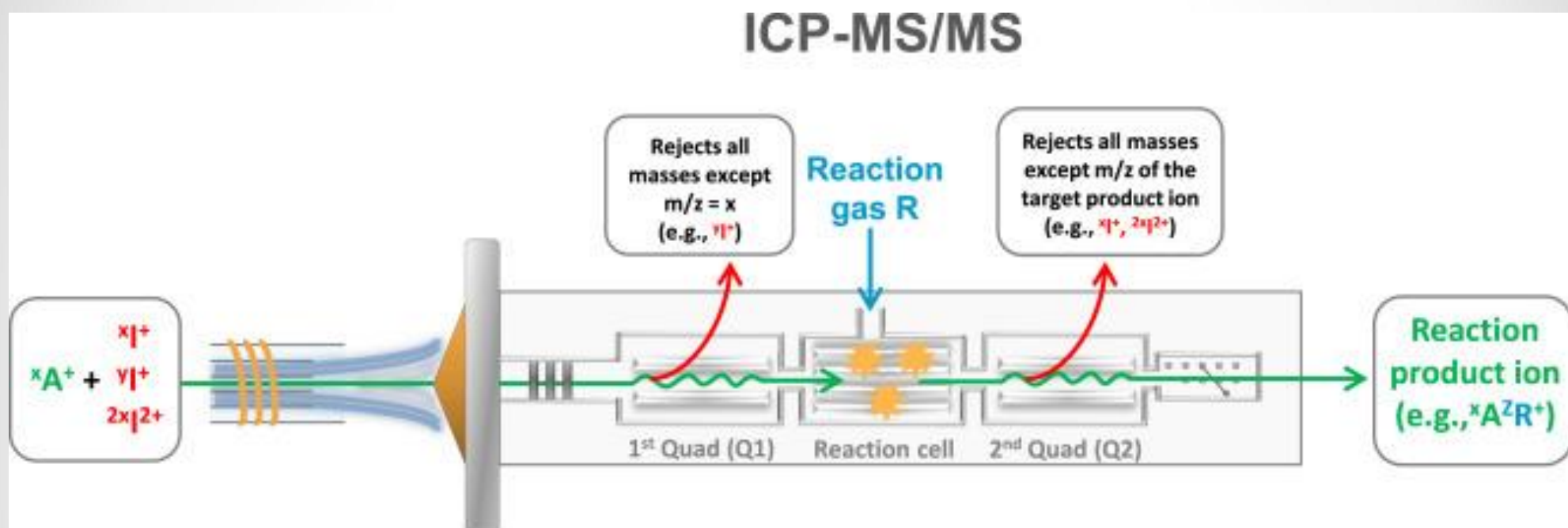
GF AAS:

- Υψηλή εκλεκτικότητα
- Χαμηλά όρια ανίχνευσης
- Στερεά δείγματα
- Χημικές παρεμποδίσεις
- Αργή τεχνική

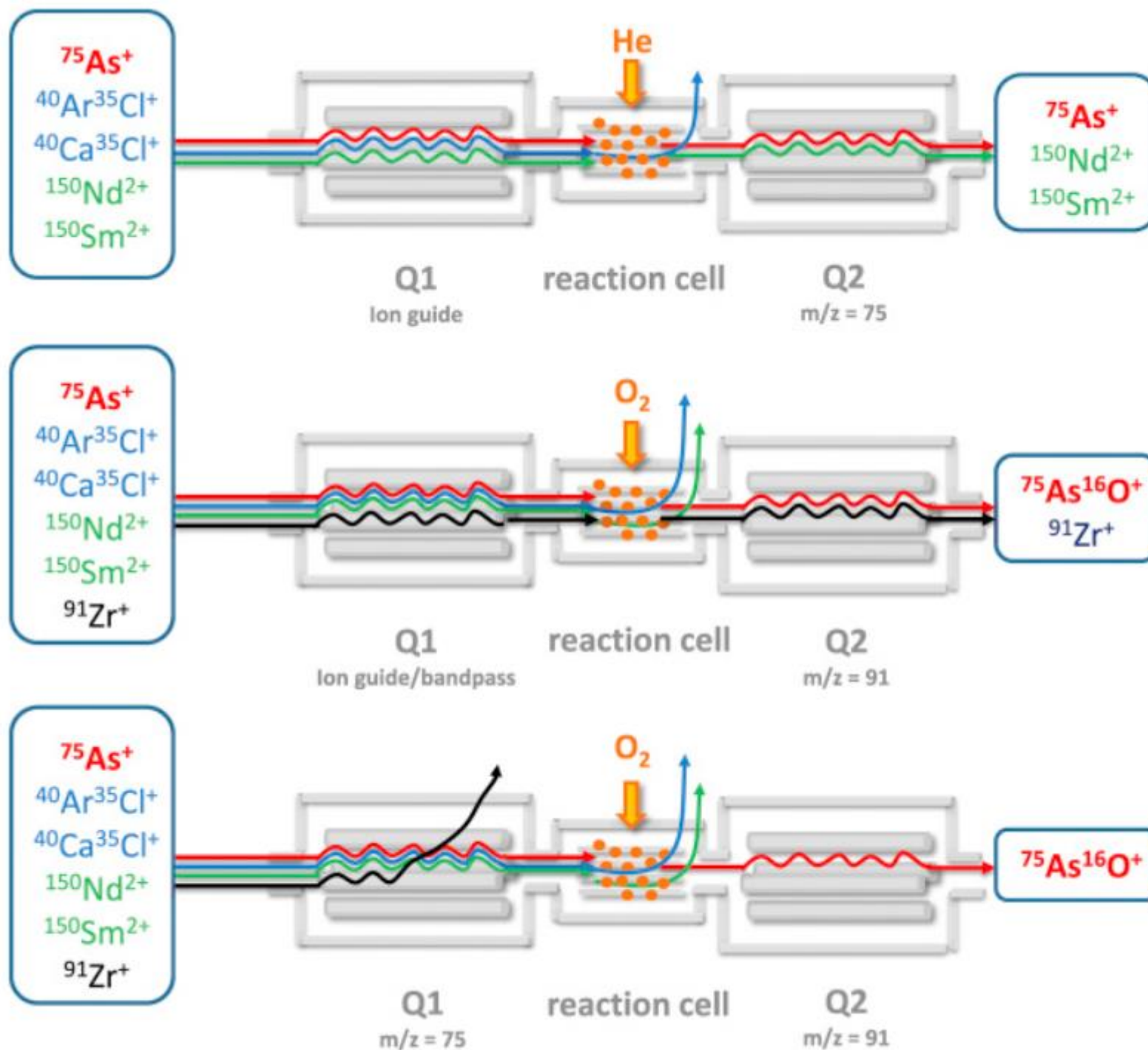
ICP MS:

- Χαμηλότερα όρια ανίχνευσης
- Μεγάλη δυναμική περιοχή
- Πολυστοιχειακή
- Ταχεία ημιποσοτική ανάλυση
- Ισοτοπική ανάλυση
- Απλότητα φάσματος
- Ισοβαρικές παρεμποδίσεις
- Υψηλό κόστος

ICP-MS/MS



ICP-MS/MS



ICP-MS/MS

