



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

ΜΟΡΙΑΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

Ενότητα 11 Laser

Δημήτρης Κονταρίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Ενδεικτική βιβλιογραφία

1. **ATKINS, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ**
P.W. Atkins, J. De Paula
(Atkins' Physical Chemistry, 9th Edition, 2010)
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2014
2. **ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ**
Στέφανος Τραχανάς
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2012
3. **ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ**
Φ. Νταής
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 2001
4. **PHYSICAL CHEMISTRY: A Molecular Approach**
D.A. McQuarrie, J.D. Simon
University Science Books, Sausalito, California, 1997
5. **PRINCIPLES OF PHYSICAL CHEMISTRY**, 2nd Edition
H. Kuhn, H.-D. Forsterling, D.H. Waldeck
John Wiley & Sons, Inc., 2000

9

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

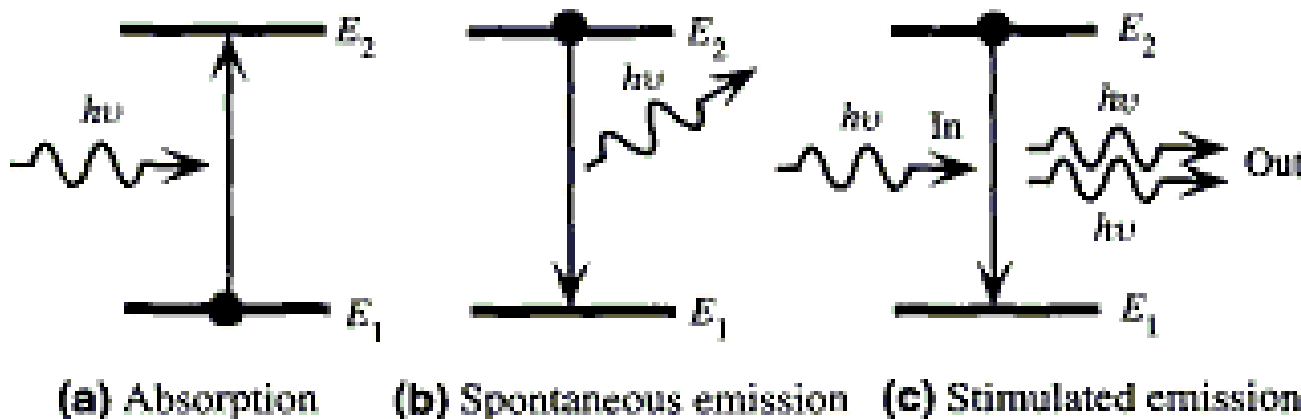
Εισαγωγή

Η λέξη **LASER** είναι ακρώνυμο που σημαίνει “*ενίσχυση του φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας*”

Η διεργασία στην οποία οφείλεται η **ενίσχυση του φωτός** σε ένα σωλήνα λέιζερ σχετίζεται με την εξαναγκασμένη εκπομπή.

Είδαμε σε προηγούμενο μάθημα ότι, για δεδομένη ένταση φωτισμού, η **πιθανότητα** ένα μόριο να πραγματοποιήσει μετάβαση μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2 είναι **ακριβώς η ίδια** για εκπομπή και απορρόφηση.

Εικόνα1



$$w = B\rho$$

$$w' = B'\rho$$

$$B = B'$$

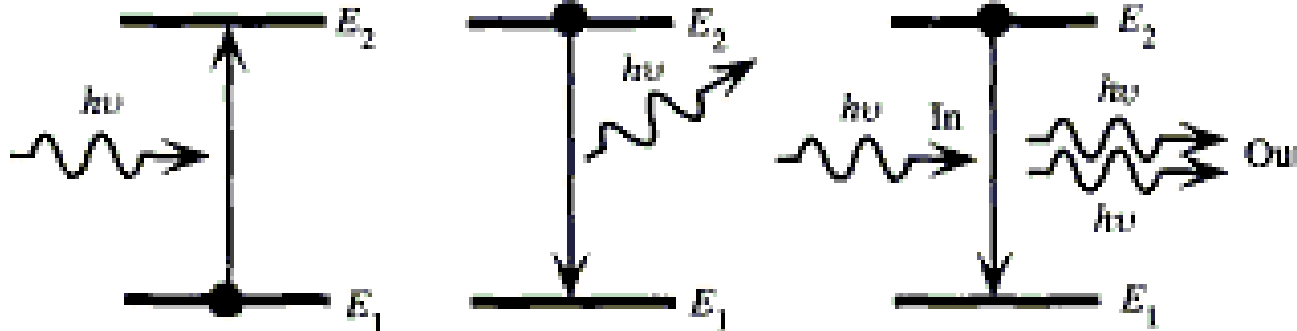
(a) Απορρόφηση, (b) αυθόρμητη εκπομπή και (c) εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας

Εισαγωγή

Αν υπάρχουν περισσότερα μόρια στην ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση, τότε το τελικό αποτέλεσμα είναι η **απορρόφηση** της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Αντίθετα, αν ο πληθυσμός της ανώτερης κατάστασης είναι μεγαλύτερος, τότε η ακτινοβολή του δείγματος θα οδηγήσει σε συνολική **εκπομπή** ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την **ενίσχυση** του προσπίπτοντος φωτός.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται τόσο αυξάνεται η πιθανότητα εκπομπής φωτονίων της ίδιας συχνότητας και, επομένως, η ένταση της παραγόμενης ακτινοβολίας (**θετική ανάδραση**).



(a) Absorption (b) Spontaneous emission (c) Stimulated emission

$$w = B\rho$$

$$w' = B'\rho$$

$$B = B'$$

(a) Απορρόφηση, (b) αυθόρμητη εκπομπή και (c) εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας

Η δράση laser

Όταν το δείγμα βρίσκεται σε **θερμική ισορροπία**, ο πληθυσμός των καταστάσεων περιγράφεται από την κατανομή Boltzmann.

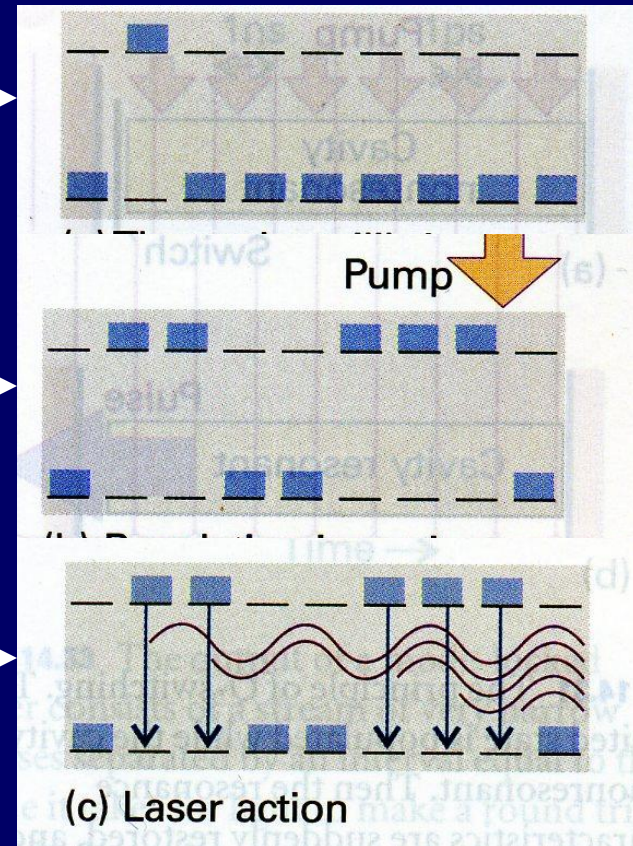
$$N_i = \frac{N e^{-E_i/kT}}{\sum_i e^{-E_i/kT}}$$

Σε συνήθεις θερμοκρασίες, και υπό συνθήκες θερμικής ισορροπίας, τα περισσότερα σωματίδια βρίσκονται στη **θεμελιώδη κατάσταση**.

Όταν η αρχική κατάσταση απορροφά, συμβαίνει **άντληση** προς τη διεγερμένη κατάσταση, με αποτέλεσμα την **αντιστροφή των πληθυσμών**.

Στη συνέχεια, συμβαίνει αλυσιδωτή, εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων με αποτέλεσμα την παραγωγή **σύμφωνης** (σε φάση) ακτινοβολίας.

Εικόνα2



Σχηματική απεικόνιση των βημάτων που οδηγούν σε δράση laser

Αντιστροφή πληθυσμών

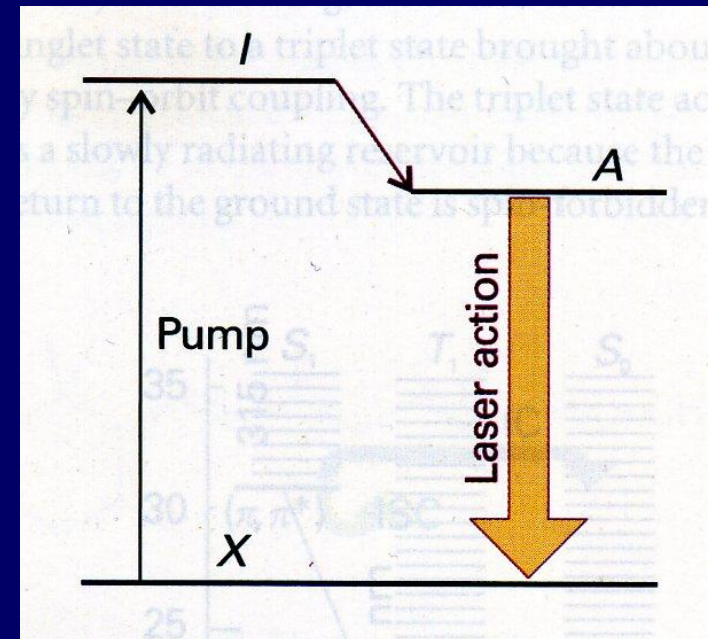
Προαπαιτούμενο για τη δράση laser είναι η ύπαρξη μιας **μετασταθούς διεγερμένης κατάστασης**, με χρόνο ζωής αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να συμμετάσχει σε εξαναγκασμένη εκπομπή.

Επειδή σε θερμική ισορροπία ο πληθυσμός της χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης είναι μεγαλύτερος, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί **αντιστροφή πληθυσμού**.

Η αντιστροφή πληθυσμού δημιουργείται έμμεσα, μέσω διέγερσης του μορίου από τη θεμελιώδη κατάσταση **X** σε μια ενδιάμεση κατάσταση **I**.

Το διεγερμένο μόριο αποβάλλει μέρος της ενέργειάς του (χωρίς ακτινοβολία) και μεταπίπτει σε μια χαμηλότερη κατάσταση, **A**.

Σε ένα laser τριών επιπέδων, η μετάβαση που οδηγεί σε δράση laser είναι η **A→X**.



Οι μεταβάσεις που εμπλέκονται σε ένα laser τριών επιπέδων

Αντιστροφή πληθυσμών

Η μετάβαση $I \leftarrow X$ προκαλείται από έναν ισχυρό παλμό φωτός, μια διεργασία που ονομάζεται **άντληση**.

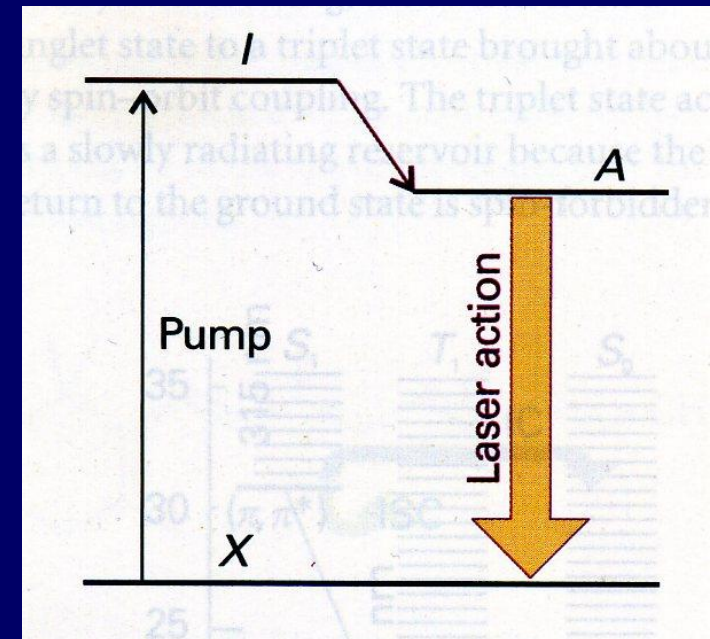
Συχνά, ο **αντλητικός παλμός** επιτυγχάνεται με ηλεκτρική εκκένωση μέσα σε αέριο ξένο, ή με το φως που προέρχεται από άλλο laser.

Η μετάβαση $I \rightarrow A$ πρέπει να είναι ταχύτατη, ενώ η μετάβαση $A \rightarrow X$ πρέπει να είναι σχετικά αργή.

Ένα μειονέκτημα του συστήματος τριών επιπέδων είναι η **δυσκολία** επίτευξης αντιστροφής πληθυσμών.

Αυτό συμβαίνει γιατί πρέπει να αντληθεί ένας **τεράστιος αριθμός** μορίων της θεμελιώδους κατάστασης.

Εικόνα3



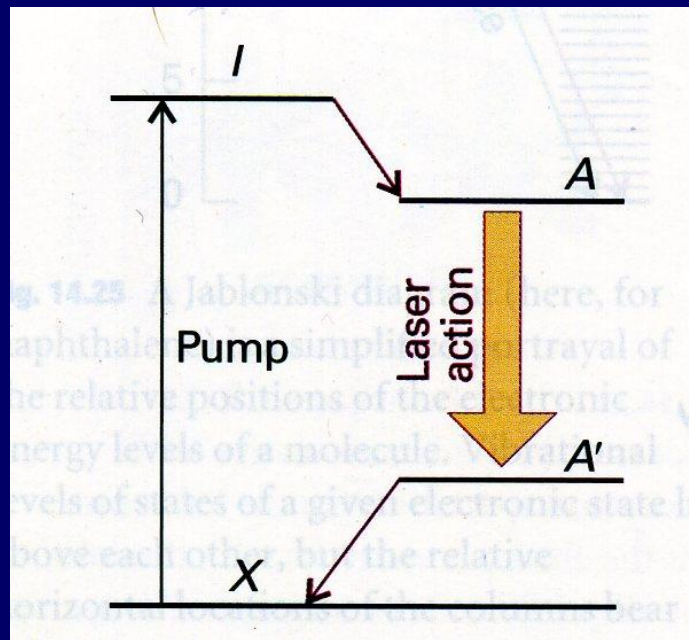
Οι μεταβάσεις που εμπλέκονται σε ένα laser τριών επιπέδων

Αντιστροφή πληθυσμών

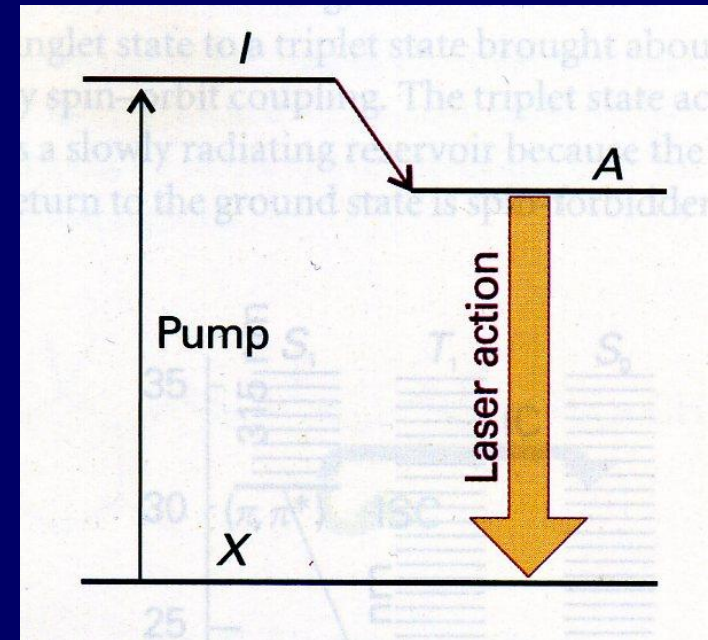
Η αντιστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται ευκολότερα σε ένα σύστημα **τεσσάρων επιπέδων**, όπου η μετάβαση laser τερματίζεται σε μια κατάσταση **A'** διαφορετική από τη θεμελιώδη.

Αρχικά, η **A'** αρχικά δεν έχει καθόλου πληθυσμό. Έτσι, οποιοσδήποτε πληθυσμός στην **A** συνεπάγεται αντιστροφή πληθυσμού και δράση laser.

Εικόνα4



Οι μεταβάσεις που εμπλέκονται σε ένα laser τεσσάρων επιπέδων



Οι μεταβάσεις που εμπλέκονται σε ένα laser τριών επιπέδων

Χαρακτηριστικά κοιλότητας

Το μέσο που παράγει την ακτινοβολία laser βρίσκεται περιορισμένο σε μια κοιλότητα, η οποία εξασφαλίζει ότι δημιουργούνται σε αφθονία μόνο **ορισμένα είδη φωτονίων** με καλά καθορισμένα χαρακτηριστικά, όπως *συχνότητα*, *διεύθυνση κίνησης*, *κατάσταση πόλωσης*.

Η κοιλότητα βρίσκεται μεταξύ δύο κατόπτρων όπου το φως υπόκειται σε **πολλαπλές ανακλάσεις**.

Συχνότητα

Στην κοιλότητα, συμβαίνει απόσβεση όλων των κυμάτων, εκτός από εκείνα για τα οποία υπάρχει ενισχυτική συμβολή: Η διαφορά συχνότητας μεταξύ γειτονικών τιμών του N είναι:

$$N \times \frac{1}{2} \lambda = L$$

$$\Delta \nu = \frac{c}{2L}$$

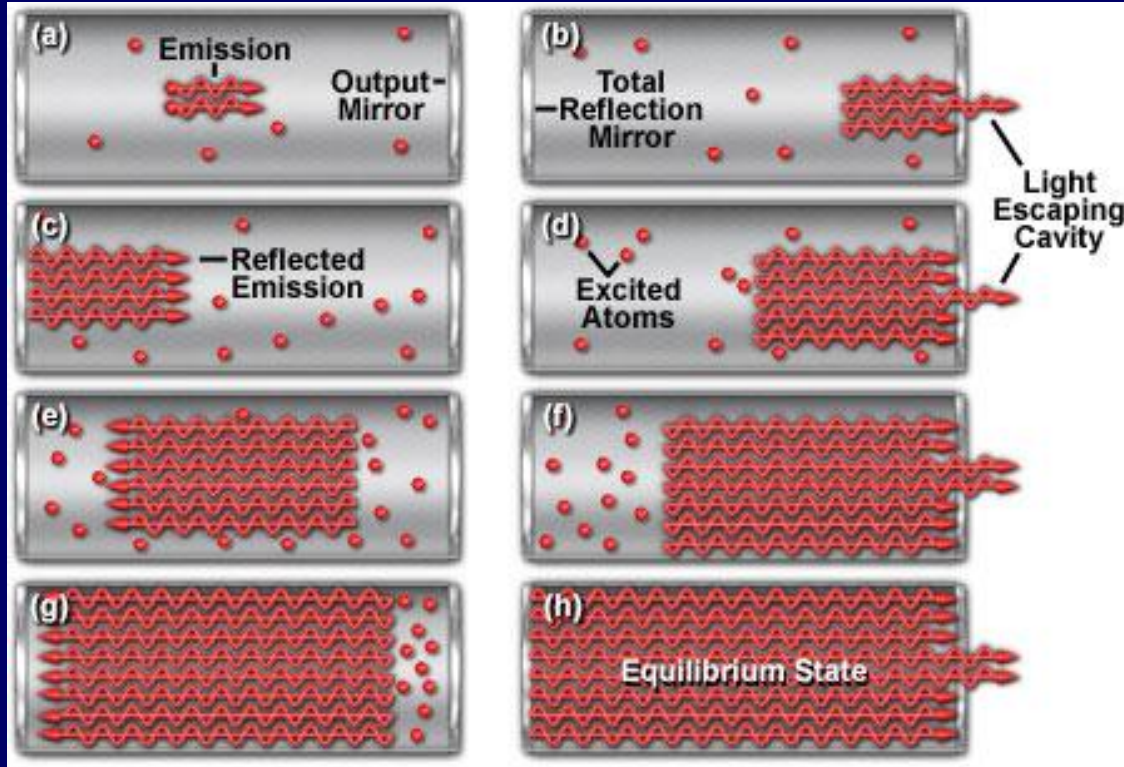
Επειδή πολλά από αυτά τα μήκη κύματος δε σχετίζονται με μεταβάσεις laser, λίγα μόνο συνεισφέρουν στη δράση αυτή.

Αυτά τα μήκη κύματος ονομάζονται **ρυθμοί συντονισμού** του laser.

Χαρακτηριστικά κοιλότητας

Ένα φωτόνιο που δημιουργείται αυθόρμητα μέσα στην κοιλότητα μπορεί να διανύσει μια απόσταση εντός του μέσου μέχρι να **προκαλέσει** εξαναγκασμένη εκπομπή ενός ακόμα φωτονίου, το οποίο με τη σειρά του θα προκαλέσει εκπομπή νέων φωτονίων, κ.ο.κ.

[Image.url](#)



Η διεργασία αυτή οδηγεί σε **ραγδαία αύξηση** της ενέργειας της ακτινοβολίας σε όλους τους ρυθμούς που υποστηρίζει.

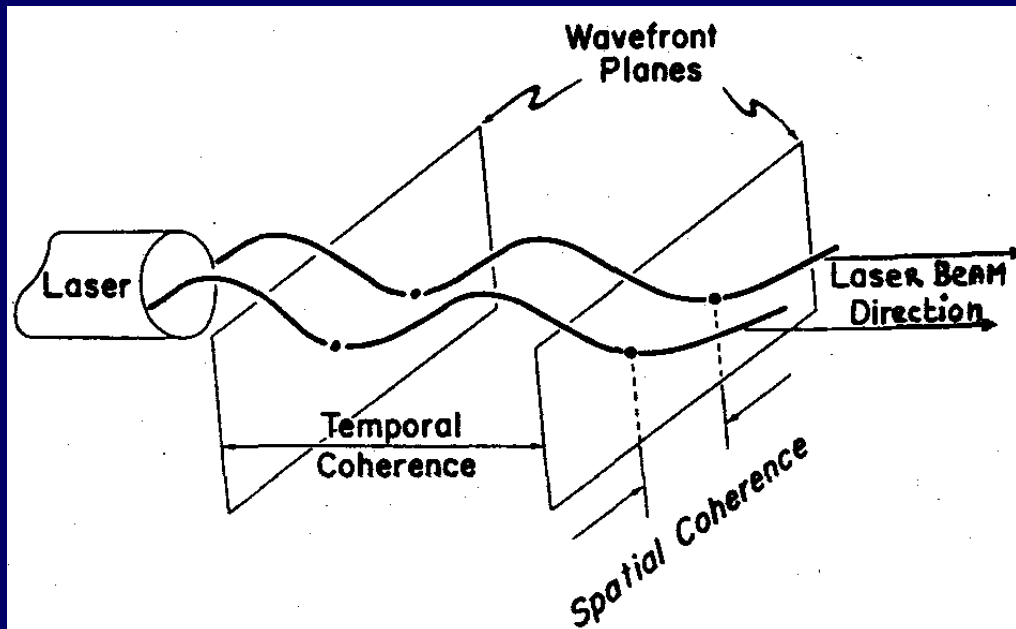
Αν ένα από τα κάτοπτρα είναι **ημιπερατό** στο φως, μέρος της ακτινοβολίας που παράγεται στην κοιλότητα μπορεί να οδηγηθεί έξω.

Χαρακτηριστικά κοιλότητας

Συμφωνία φάσης

Η ακτινοβολία laser είναι **σύμφωνη**, με την έννοια ότι τα ηλεκτρομαγνητικά της κύματα βρίσκονται **σε φάση**, χωρική και χρονική.

Εικόνα5

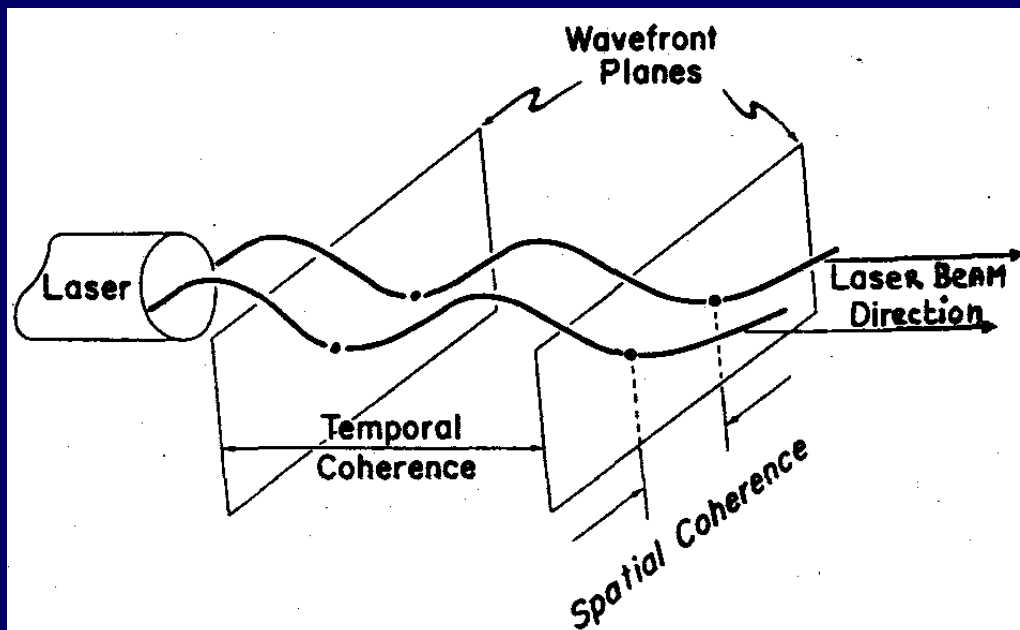


Συναφή στο **χώρο** είναι δύο κύματα με σταθερή σχέση σε ένα “μέτωπο κύματος” (ίδια φάση σε μια κάθετη διατομή της δέσμης)

Συναφή στο **χρόνο** είναι δύο κύματα που εξακολουθούν να έχουν την ίδια φάση καθώς διαδίδονται.

Χαρακτηριστικά κοιλότητας

Η χρονική συμφωνία εκφράζεται συναρτήσει του μήκους συμφωνίας, l_c , και σχετίζεται με το εύρος $\Delta\lambda$ της κατανομής των μηκών κύματος που είναι παρόντα στη δέσμη.



$$l_c = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}$$

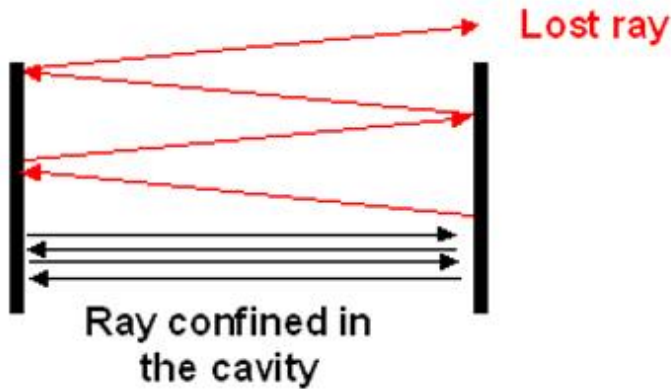
Για απόλυτα μονοχρωματική ακτινοβολία, είναι $\Delta\lambda=0$ και τα κύματα παραμένουν σε φάση για άπειρη απόσταση.

Ένας τυπικός λαμπτήρας παράγει φως με $l_c=400 \text{ nm}$, ενώ ένα laser ηλίου- νέου με $\Delta\lambda=2$ έχει $l_c=10 \text{ cm}$.

Χαρακτηριστικά κοιλότητας

Διεύθυνση κίνησης

[Image.url](#)



Μόνο τα φωτόνια που διαδίδονται **παράλληλα** στον άξονα της κοιλότητας ανακλώνται μεταξύ των κατόπτρων και **ενισχύονται**, ενώ τα άλλα χάνονται στο περιβάλλον.

Για το λόγο αυτό, η ακτινοβολία laser είναι ισχυρά **κατευθυντική** και σχηματίζει δέσμη με πολύ **μικρή διασπορά**.

Πόλωση

Η δέσμη laser μπορεί να είναι πολωμένη. Αυτό σημαίνει ότι, στην περίπτωση της **γραμμικής πόλωσης**, το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου της ακτινοβολίας βρίσκεται σε ένα **ορισμένο επίπεδο**.

Η πόλωση μπορεί να επιτευχθεί με:

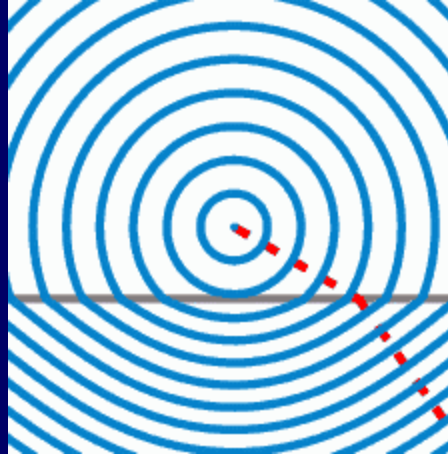
- την εισαγωγή ενός πολωτικού φίλτρου εντός της κοιλότητας, ή
- μέσω του σχήματος του δοχείου (**παράθυρα Brewster**)

Γωνία πρόσπτωσης Brewster

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$

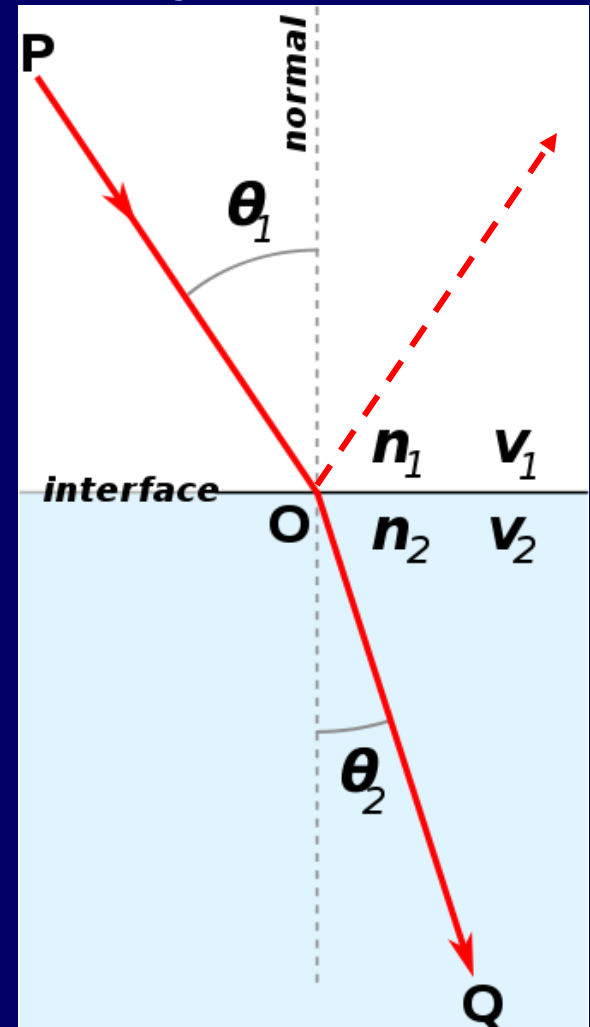
[Image.url](#)



Η σχέση μεταξύ των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης που παρατηρούνται κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικό δείκτη διάθλασης περιγράφεται από το **Νόμο του Snell**.

Γωνία Brewster ή **γωνία ολικής πόλωσης** είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα είναι **κάθετη** με τη διαθλώμενη ακτίνα.

[Image.url](#)

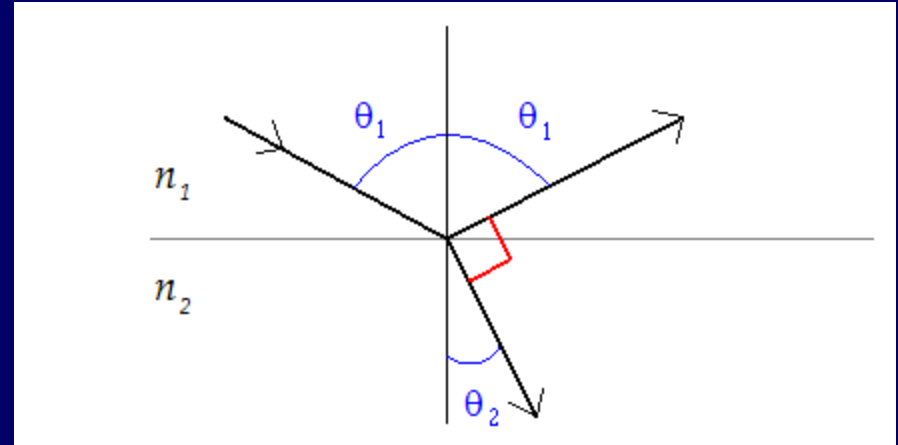


Διάθλαση ακτινοβολίας μεταξύ δύο μέσων με διαφορετικό δείκτη διάθλασης ($n_2 > n_1$)

Γωνία πρόσπτωσης Brewster

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$



Η γωνία Brewster (θ_B) μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο του Snell θέτοντας $\theta_1 = \theta_B$ και $\theta_2 = 90^\circ - \theta_B$:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\theta_B)}{\sin(90^\circ - \theta_B)} = \frac{\sin(\theta_B)}{\cos(\theta_B)} = \tan(\theta_B) \Rightarrow \theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Για ακτίνα φωτός που προσπίπτει από τον αέρα ($n \approx 1$) στο γυαλί ($n = 1,5$), η γωνία Brewster είναι $\theta_B \approx 57^\circ$.

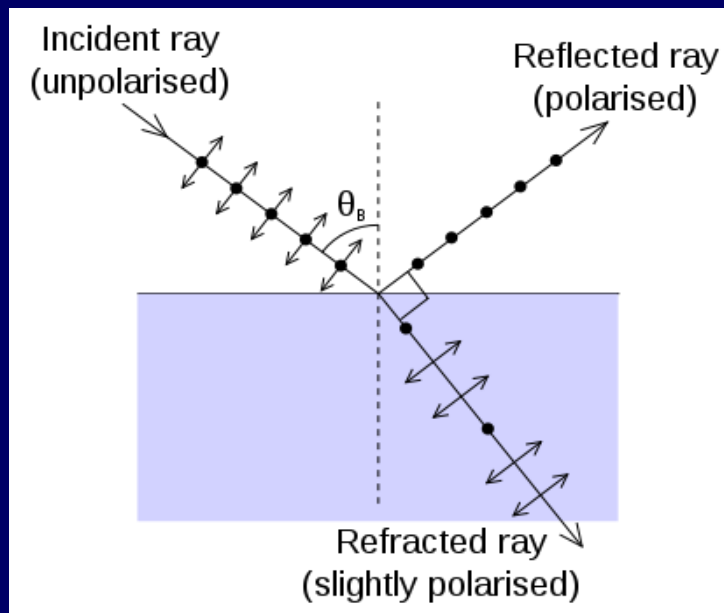
Γωνία πρόσπτωσης Brewster

Αν η γωνία της προσπίπτουσας δέσμης στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων είναι διάφορη του μηδενός, τότε η ανακλώμενη και η διαθλώμενη δέσμη είναι **μερικά πολωμένες**.

Όταν μια μη πολωμένη ακτίνα φωτός προσπίπτει με γωνία Brewster στην επιφάνεια διαφανούς διηλεκτρικού υλικού,

- η ανακλώμενη δέσμη είναι **ολικά πολωμένη**, ενώ
- η διαθλώμενη δέσμη είναι **μερικά πολωμένη**.

[Image.url](#)



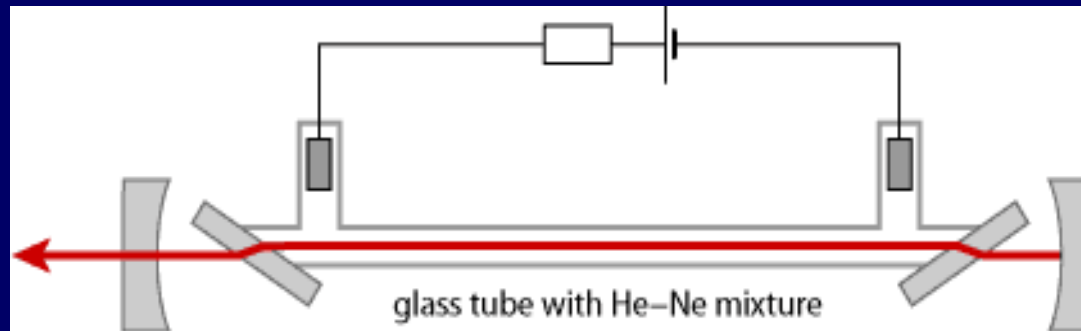
Η ιδιότητα αυτή αξιοποιείται σε ορισμένα laser, τα οποία χρησιμοποιούν **παράθυρα Brewster**, ώστε να επιτευχθεί πόλωση της δέσμης.

Γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, θ_B , (γωνία Brewster) για την οποία η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους.

Παράθυρα Brewster

Σε ένα **laser αερίου**, τα παράθυρα από τα οποία εξέρχεται η δέσμη τοποθετούνται στα άκρα του σωλήνα εκκένωσης έτσι ώστε η δέσμη να προσπίπτει σ' αυτά υπό γωνία Brewster.

Εικόνα6

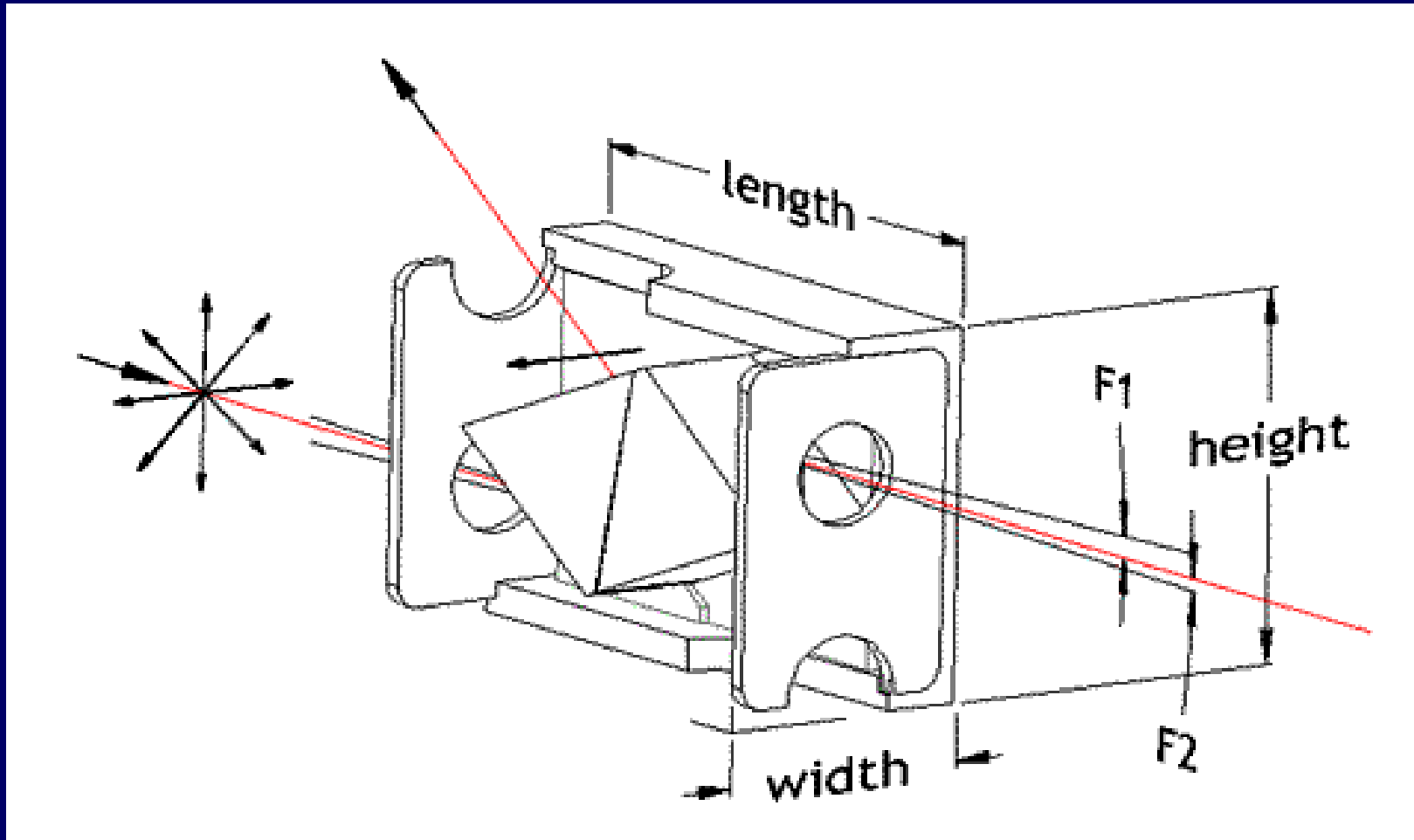


Η δέσμη που διέρχεται για **πρώτη φορά** από το παράθυρο Brewster είναι **μερικά πολωμένη**.

Επειδή όμως το όλο σύστημα είναι τοποθετημένο μέσα σ' ένα **οπτικό αντηχείο** (παράλληλα κάτοπτρα με μήκος ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος), η δέσμη διέρχεται πάρα πολλές φορές (100 ή και περισσότερες) από τα παράθυρα. Κάθε φορά ο βαθμός πόλωσης αυξάνει μέχρι, τελικά, να γίνει ίσος με τη μονάδα, οπότε η δέσμη θα εξέλθει **ολικά πολωμένη**.

Παράθυρα Brewster

[Image.url](#)



Ιδιότητες του φωτός laser

(α) **Συμφωνία φάσεως**. Σε αντίθεση με τους κοινούς λαμπτήρες, όπου τα άτομα ακτινοβολούν αυθόρμητα, χωρίς καμιά συσχέτιση μεταξύ τους, στο σωλήνα laser όλες οι αποδιεγέρσεις είναι εξαναγκασμένες.

Τα φωτόνια που προκύπτουν είναι **ακριβή αντίγραφα** – σε συχνότητα και φάση – του αρχικού φωτονίου.

(β) **Κατευθυντικότητα**. Οι δέσμες λέιζερ χαρακτηρίζονται από μεγάλη κατευθυντικότητα, διότι ο σωλήνας λέιζερ ενισχύει μόνο εκείνα τα φωτόνια που είναι απολύτως ευθυγραμμισμένα με τον άξονά του.

(γ) **Ένταση**. Η ένταση ενός κοινού λέιζερ συνεχούς λειτουργίας μπορεί να εκτείνεται από 10^{-3} W/cm^2 μέχρι 10^4 W/cm^2 .

Το εντυπωσιακό με το λέιζερ είναι ότι αυτή η ένταση εκπέμπεται σε μια αφάνταστα στενή φασματική περιοχή.

(δ) **Μονοχρωματικότητα**. Το φως λέιζερ, μπορεί να έχει φασματικό εύρος μέχρι και εκατομμύρια φορές μικρότερο από το πλάτος της γραμμής από την οποία εκκινεί η μετάβαση λέιζερ.

Αναφορές

Οι εικόνες 1,2,3,4,5,6 είναι από το βιβλίο
ATKINS, ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ, P.W. Atkins, J. De Paula
(Atkins' Physical Chemistry, 9th Edition, 2010)
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2014

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Σημείωμα Ιστορικού εκδόσεων έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0.

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών. Αναπληρωτής Καθηγητής, Δημήτρης Κονταρίδης. «Μοριακή Φασματοσκοπία». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2173/>

Σημείωμα αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.