



Οπτικές Ιδιότητες των Ιστών

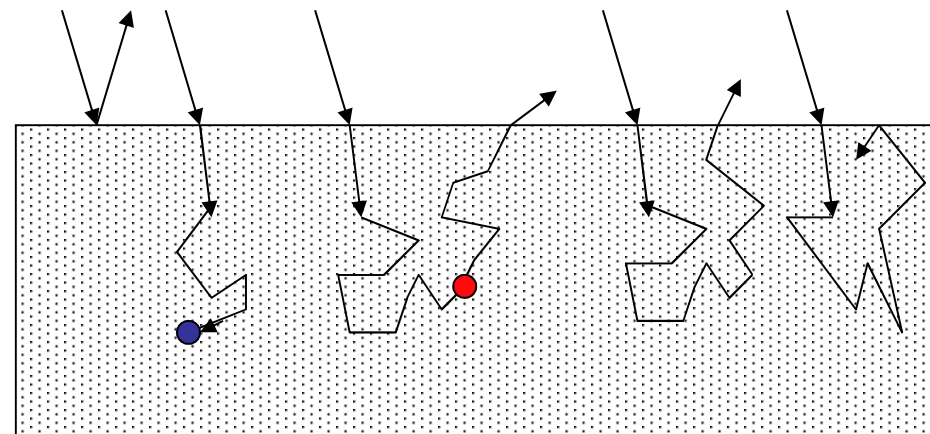
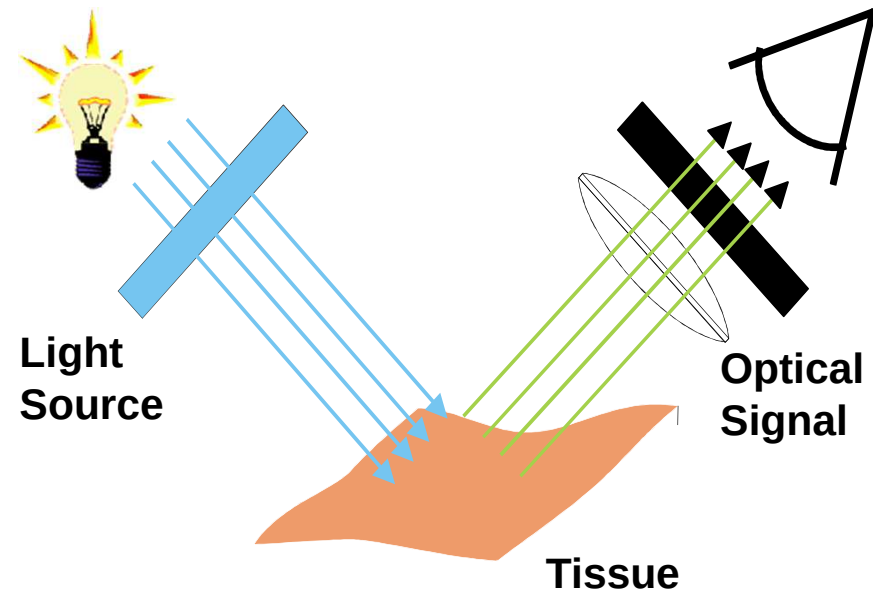


- **Αλληλεπίδραση φωτός και ιστών**

- Ανάκλαση (Reflection)
- Διάθλαση (Refraction)
- Απορρόφηση (Absorption)
- Φθορισμός (Fluorescence)
- Σκέδαση (Scattering)

- **Εξαρτάται από**

- Τα συστατικά του ιστού
- Οπτικές ιδιότητες του ιστού
- Διάδοση του φωτός



Απορρόφηση (Absorption)

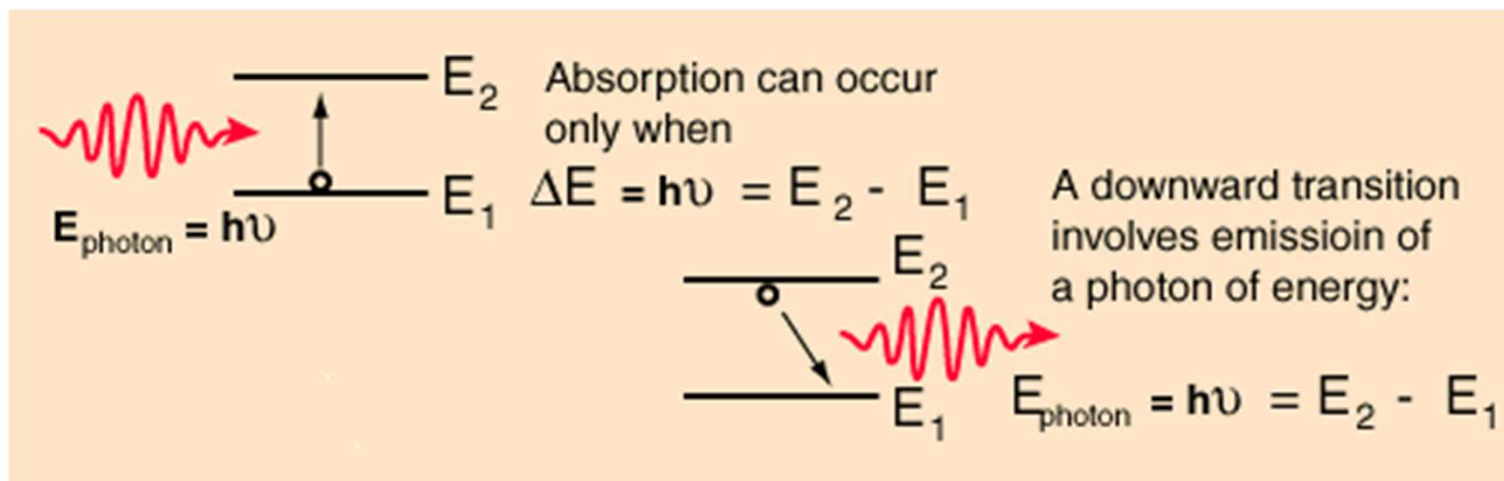


- **Εξαγωγή ενέργειας από το φως από κάποια μόρια**
- **Διαγνωστικές εφαρμογές:** μεταβάσεις μεταξύ δύο επιπέδων ενέργειας σε ένα μόριο που είναι επακριβώς προσδιορισμένες σε συγκεκριμένα μήκη κύματος θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως φασματικό απότύπωμα του μορίου
 - Διάφοροι τύποι χρωμοφόρων (απορροφητές φωτός) στον ιστό
 - Απορρόφηση που εξαρτάται από το μήκος κύματος
 - Ανίχνευση όγκων και εκτιμήσεις άλλων φυσιολογικών παραμέτρων (π.χ. παλμική οξυμετρία)
- **Θεραπευτικές εφαρμογές:** Η απορρόφηση της ενέργειας είναι ο κύριος μηχανισμός που επιτρέπει στο φως από κάποια πηγή (laser) να παράγει φυσικές αλλοιώσεις στους ιστούς για σκοπούς θεραπείας
 - Διόρθωση οφθαλμολογικών προβλημάτων με Lasik (Laser Assisted in situ Keratomileusis), Αφαίρεση τατουάζ, Φωτοδυναμική θεραπεία

Απορρόφηση (Absorption)



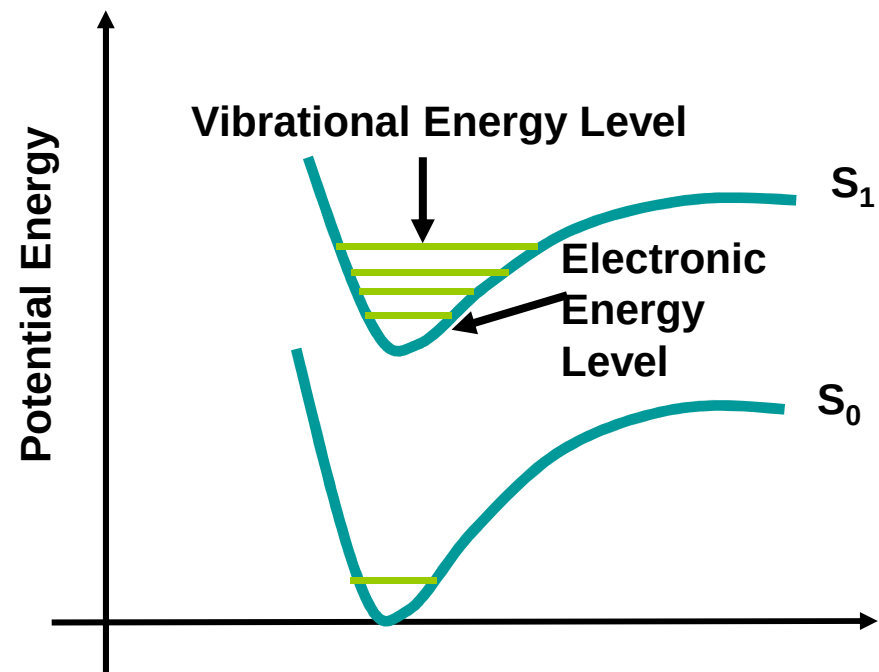
- Απορρόφηση εμφανίζεται όταν η συχνότητα του φωτονίου ταιριάζει με την “συχνότητα” που χαρακτηρίζει τη μεταβατική ενέργεια του μορίου
 - Τα ηλεκτρόνια απορροφούν την ενέργεια του φωτός και τη μετατρέπουν σε δονητική (vibrational) κίνηση
 - Η απορρόφηση ενός φωτονίου έχει ως αποτέλεσμα:
 - κβαντική αλλαγή στο διαχωρισμού φορτίων (charge separation)
 - κβαντική διέγερση τρόπων δόνησης (vibrational modes)
 - Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά άτομα → μετατρέπουν δονητική ενέργεια σε θερμική ενέργεια



Απορρόφηση (Absorption)



- Κάθε ηλεκτρονικό επίπεδο ενέργειας (electronic energy level) συνδέεται με πολλά δονητικά επίπεδα ενέργειας
- Απορρόφηση υπεριώδους και ορατού φωτός προκαλεί την μετάβαση μεταξύ ηλεκτρονικών επιπέδων ενέργειας
- Απορρόφηση υπέρυθρου φωτός προκαλεί μεταβάσεις μεταξύ δονητικών επιπέδων ενέργειας

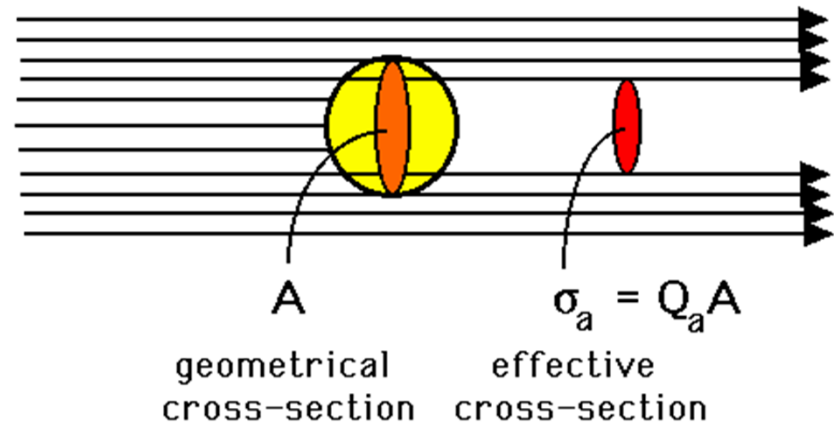


Απορρόφηση (Absorption)



- **Διατομή (Cross-section) απορρόφησης, σ_a [m²]**

- Θεωρήστε ένα χρωμόφορο, εξιδανικευμένο ως μια σφαίρα, με ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό μέγεθος.
- Θεωρήστε ότι αυτή η σφαίρα φράσσει το προσπίπτον φως και ρίχνει μια σκιά, η οποία αποτελεί την απορρόφηση.
- Το μέγεθος της σκιάς απορρόφησης = διατομή απορρόφησης
- Q_A : αποδοτικότητα (efficiency) απορρόφησης

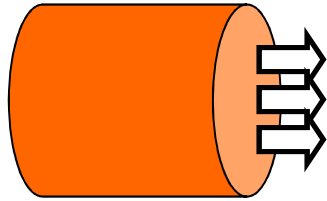


$$\sigma_a = Q_a \cdot A$$

Απορρόφηση (Absorption)

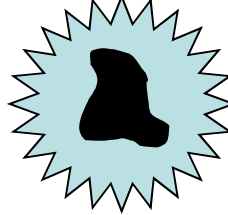


$$P_{in} = I_o A$$

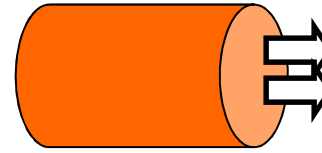


Incident Beam

$$P_{abs} = I_o \sigma_a$$

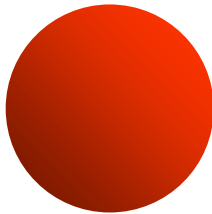


$$P_{out} = I_o (A - \sigma_a)$$



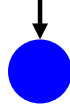
Outgoing Beam

Area = A

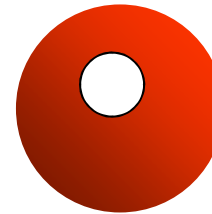


-

Area = σ_a



=



$$P_{out} = I_o (A - \sigma_a)$$

area = $A - \sigma_a$

$$\sigma_a = \frac{P_{abs}}{I_o}$$

Απορρόφηση (Absorption)



- **Υποθέσεις**

- Διατομή ανεξάρτητη από τον σχετικό προσανατολισμό του προσπίπτοντος φωτός και ομοιόμορφη κατανομή N_a (molecules/cm³) ομοιόμορφων απορροφητικών σωματίδια

- **Συντελεστής Απορρόφησης (Absorption Coefficient), μ_a [1/m]**

$$\mu_a = N_a \cdot \sigma_a$$

- Διατομή απορρόφησης ανά μονάδα όγκου του μέσου

- **Μέση ελεύθερη διαδρομή (mean free path) απορρόφησης, l_a [m]**

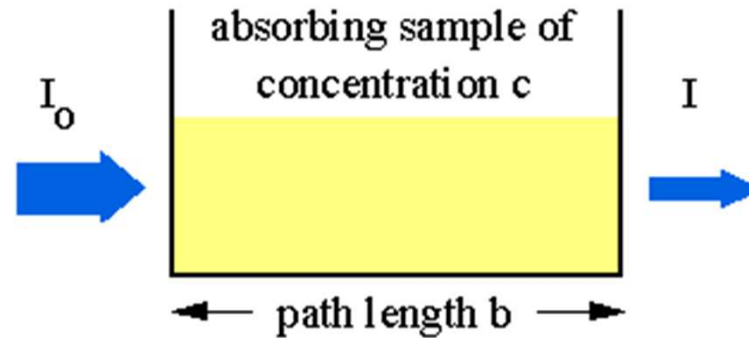
$$l_a = \frac{1}{\mu_a}$$

- Αντιπροσωπεύει τη μέση απόσταση την οποία ταξιδεύει ένα φωτόνιο πριν απορροφηθεί

Απορρόφηση (Absorption)



- Διαπερατότητα και απορρόφηση (μακροσκοπική άποψη)



- Διαπερατότητα (Transmission)

$$T = \frac{I}{I_o}$$

- Απορρόφηση (Absorbance) (ή εξασθένηση (attenuation), ή οπτική πυκνότητα (optical density))

$$A = -\log(T) = \log\left(\frac{I_o}{I}\right)$$

Απορρόφηση (Absorption)



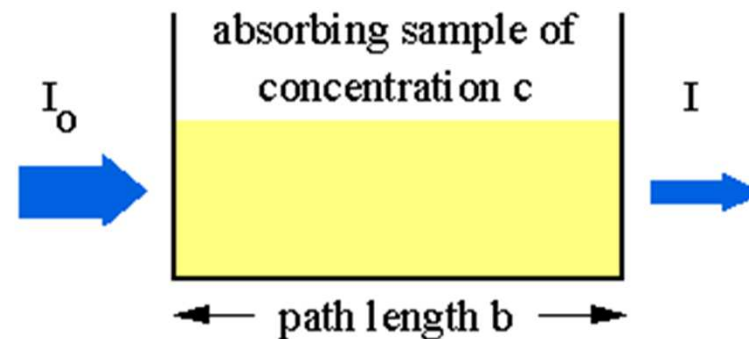
- **Νόμος Lambert-Beer:**

- Η γραμμική σχέση μεταξύ απορρόφησης (absorbance) και συγκέντρωσης (concentration) ενός απορροφητικού είδους (absorbing species)
- Συσχετίζει μ_a , διαπερατότητα και απορρόφηση

$$I = I_0 e^{-\mu_a \cdot b}$$

$$\mu_a = N_a \cdot \sigma_a$$

$$\sigma_a = \frac{P_{abs}}{I_0}$$



σ = absorption cross-sectional area [cm^2]

I_0 = The intensity entering the sample at $z = 0$ [w/cm^2]

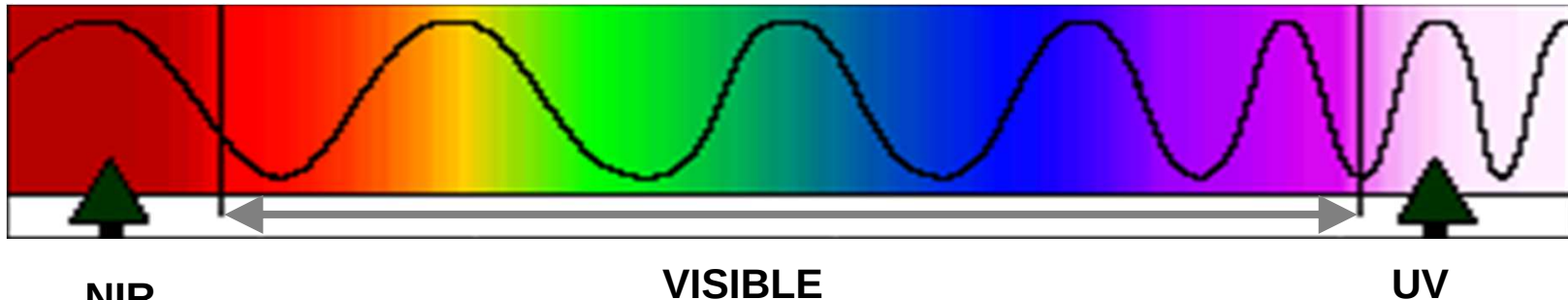
I = The intensity of light leaving the sample [w/cm^2]

b = pathlength traveled in the sample [cm]

Απορρόφηση (Absorption)



Απορρόφηση στους Ιστούς



• NIR

- Αιμοσφαιρίνη (Hemoglobin)
- Λιπίδια (Lipids)
- Νερό (Water)

• UV-VIS

- DNA
- Αιμοσφαιρίνη (Hemoglobin)
- Λιπίδια (Lipids)
- Δομικές Πρωτεΐνες (Structural protein)*
- Φορείς Ελεκτρονίων (Electron carriers)*
- Αμινοξέα (Amino acids)*

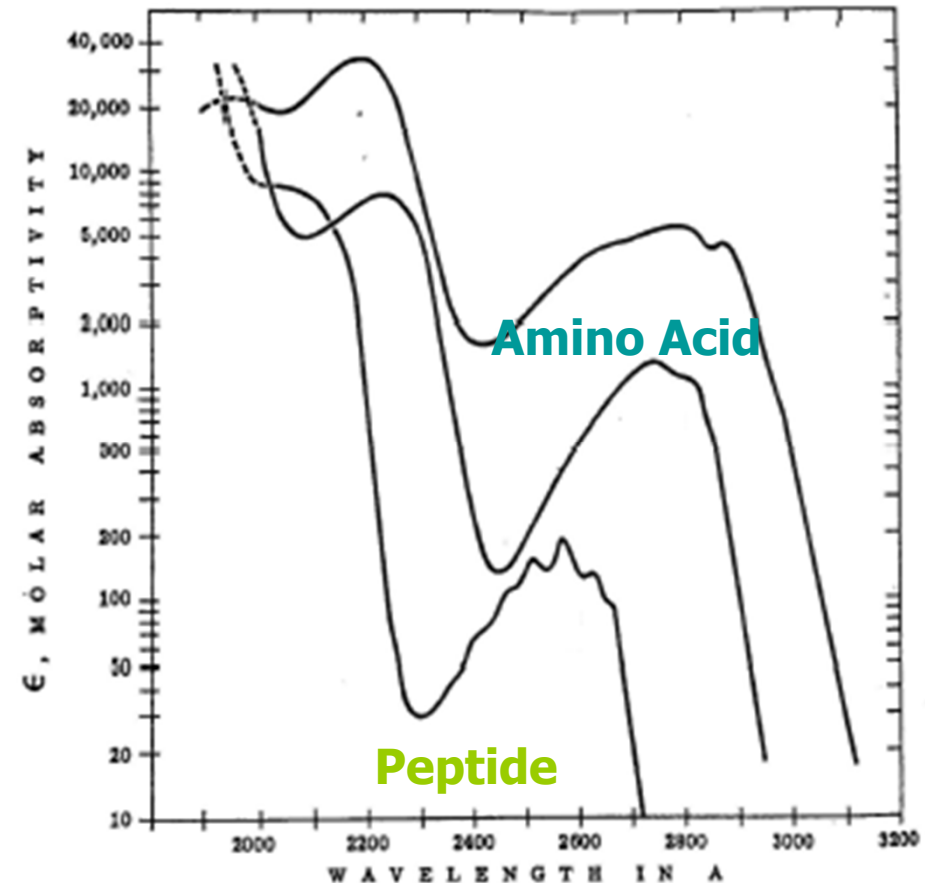
* Φθορίζουν όταν διεγερθούν με UV-VIS

Απορρόφηση (Absorption)



- **Απορρόφηση UV**

- Πρωτεΐνες, αμινοξέα, λιπαρά οξέα και DNA κυριαρχούν στην απορρόφηση UV
- Πρωτεΐνες (Proteins)
 - Το κυριότερο συστατικό όλων των μαλακών ιστών μετά το νερό, ~ 30%
 - Οι ιδιότητες απορρόφησης καθορίζονται από πεπτιδικούς δεσμούς (peptide bonds) και υπόλοιπα αμινοξέων (amino acid residues)
 - Διέγερση πεπτιδίων γύρω από $\lambda = 190 \text{ nm}$
 - Απορρόφηση αμινοξέων στα $\lambda = 210 - 220 \text{ nm}$ και $260 - 280 \text{ nm}$
- DNA
 - Απορροφά ακτινοβολία για $\lambda \leq 320 \text{ nm}$
- Ψηλή απορρόφηση νερού $\lambda < 180 \text{ nm}$

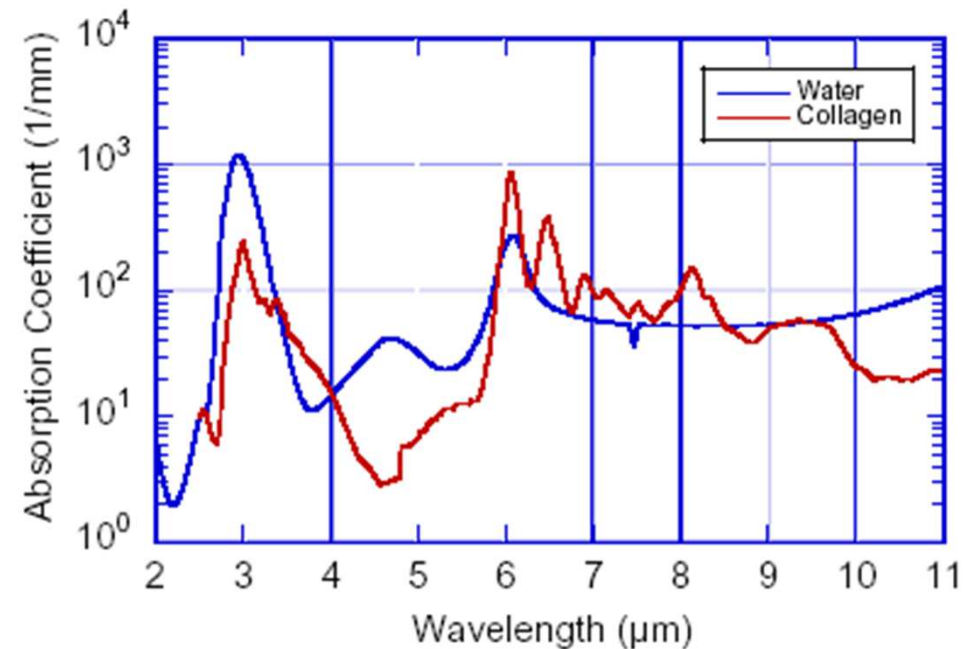


Απορρόφηση (Absorption)



• Υπέρυθρη (Infrared) Απορρόφηση

- Η IR απορρόφηση των πρωτεϊνών παρουσιάζει κορυφές στα 6.1, 6.45, και 8.3 μm λόγω της διέγερσης αμινοξέων
- Βάθος απορρόφησης $\leq 10 \mu\text{m}$ στην περιοχή $\lambda = 6-7 \mu\text{m}$
- Η απορρόφηση του νερού παρουσιάζει κορυφές στα 0.96, 1.44, 1.95, 2.94 και 6.1 μm
- Βάθος απορρόφησης
 - $\sim 500 \text{ mm}$ σε $\lambda = 800 \text{ nm}$
 - $< 1 \mu\text{m}$ σε $\lambda = 2.94 \mu\text{m}$
 - $\leq 20 \mu\text{m}$ για $\lambda \geq 6 \mu\text{m}$

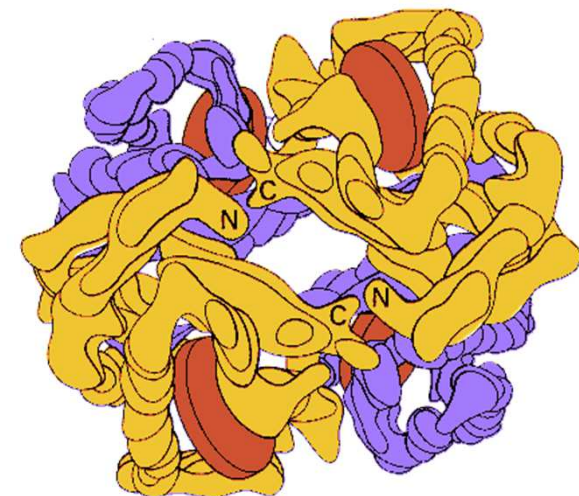
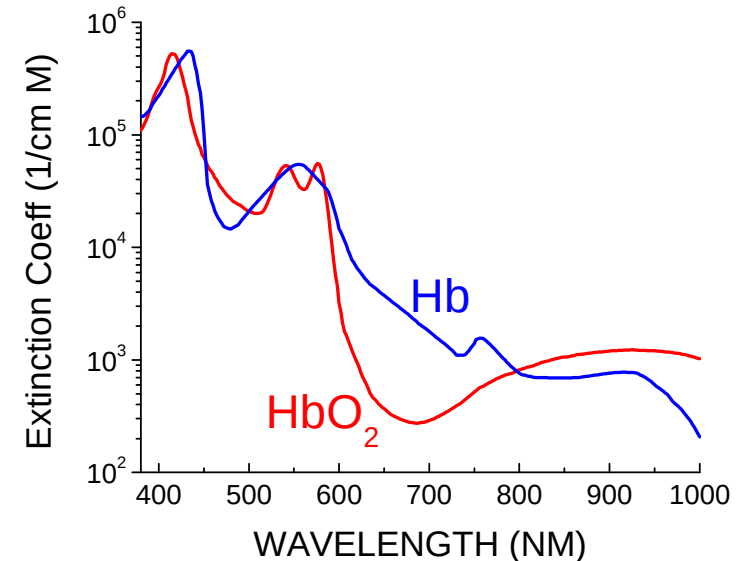


Απορρόφηση (Absorption)



Αιμοσφαιρίνη (Hemoglobin)

- Υπεύθυνη για τη μεταφορά οξυγόνου
 - HbO₂ και Hb
 - Ο κορεσμός με οξυγόνο είναι ένας δείκτης της παροχής και αξιοποίησης οξυγόνου καθώς και της μεταβολικής δραστηριότητας
- Η Δεοξυαιμοσφαιρίνη έχει χαμηλότερη απορρόφηση από την οξυαιμοσφαιρίνη στο μπλε και πράσινο
 - Φωτεινό κόκκινο αρτηριακό αίμα
 - Μπλε φλεβικό αίμα
- Κορυφές απορρόφησης στο HbO₂
 - 418, 542, 577, και 925 nm
- Κορυφές απορρόφησης στο Hb
 - 550, 758, 910 nm
- Σημεία ίσης απορρόφησης (Isosbestic points)
 - 547, 569, 586, και 798 nm

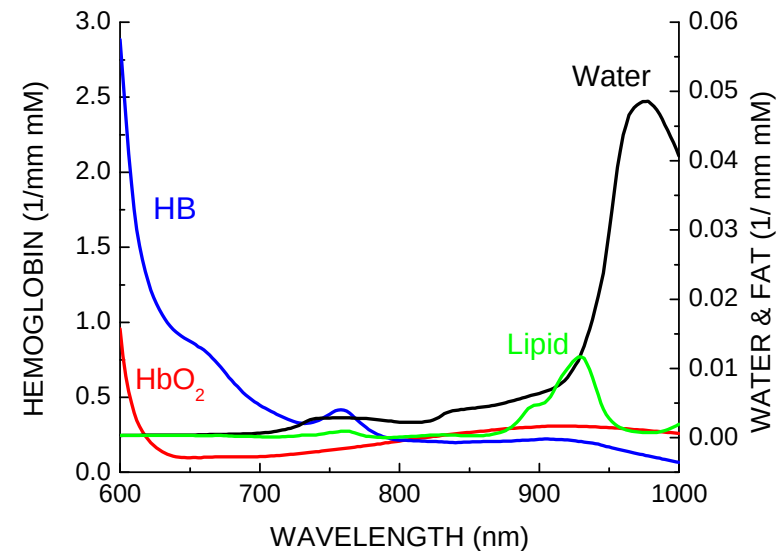


Απορρόφηση (Absorption)



Λιπίδια (Lipids) (Λίπος(Fat))

- Σημαντικές αποθήκες ενέργειας στο σώμα
- Μετρήσεις σύστασης του σώματος (body composition) σε εξειδικευμένες περιοχές (site-specific)
- Παρακολούθηση των φυσιολογικών αλλαγών στο ιστό του γυναικείου μαστού
- Μοντέλο ιστών στρωμάτων (Tissue layer model)



Σκέδαση (Scattering)

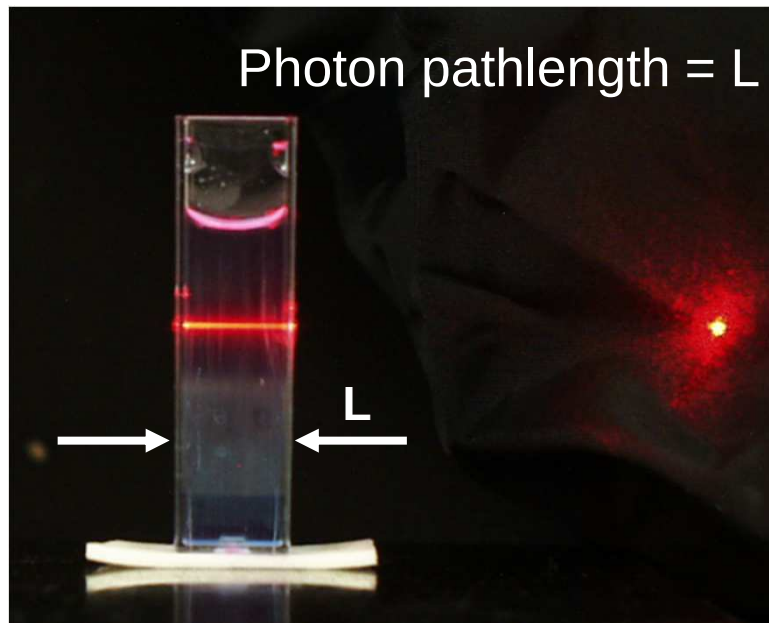


- **Αλλαγή της κατεύθυνσης της διάδοσης ή/και ενέργειας του φωτός από ένα μοριακό είδος**
- **Διαγνωστικές εφαρμογές:** Η σκέδαση εξαρτάται από το μέγεθος, τη μορφολογία και τη δομή των συνιστούντων των ιστών (π.χ. μεμβράνη λιπιδίων, ίνες κολλαγόνου, πυρήνες).
 - Παραλλαγές σε αυτές τις συνιστώσες, που οφείλεται σε νόσο, θα μπορούσε να επηρεάσει τις ιδιότητες σκέδασης, παρέχοντας έτσι ένα μέσο για διαγνωστικούς σκοπούς
- **Θεραπευτικές εφαρμογές:** Τα σήματα σκέδασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί η βέλτιστη δοσिमетρία φωτός και παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες κατά τη διάρκεια της θεραπείας

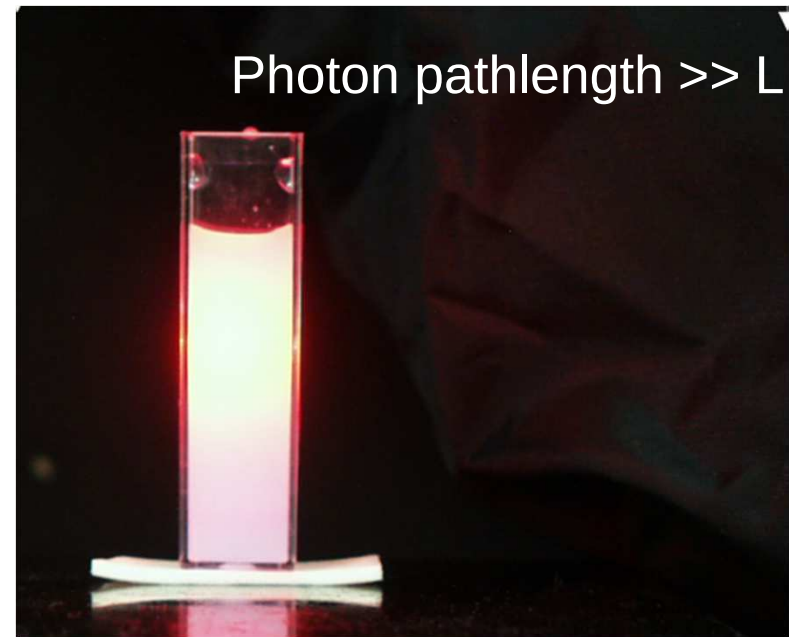
Σκέδαση (Scattering)



Αποκλειστικά απορρόφηση



Με σκέδαση

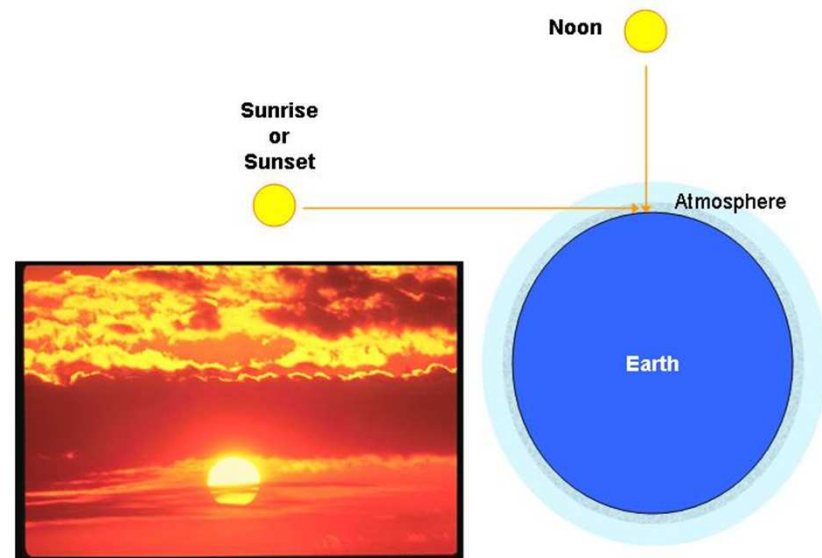


Ο Νόμος Lambert- Beer Law δεν ισχύει εδώ!!!
Πρέπει να ξανα-υπολογιστεί το πραγματικό
μήκος διαδρομής (pathlength) του φωτός.

Σκέδαση (Scattering)



- **Γιατί ο ουρανός είναι μπλε, λευκά τα σύννεφα, και το ηλιοβασίλεμα κόκκινο;**
 - Ο μπλε ουρανός είναι αποτέλεσμα της σκέδασης των μικρότερων μήκων κύματος
 - Το ορατό φως (μοβ και μπλε) σκεδάζεται επιλεκτικά από το O_2 και N_2 - πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος του φωτός
 - Σκεδάζεται ξανά και ξανά
 - Όταν το φως συναντά μεγαλύτερα σωματίδια (νέφωση, ομίχλη), παρουσιάζει σκέδαση Mie
 - Η σκέδαση Mie δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος - φαίνονται λευκά
 - Όπως και ο καπνός του τσιγάρου
 - Στη δύση του ηλίου
 - Το φως αναγκάζεται να ταξιδέψει σε μεγαλύτερη διαδρομή μέσα από την ατμόσφαιρα
 - Το Μπλε/πράσινο σκεδάζεται μακριά και μόνο το κόκκινο/πορτοκαλί (λιγότερη σκέδαση) φτάνει τα μάτια μας

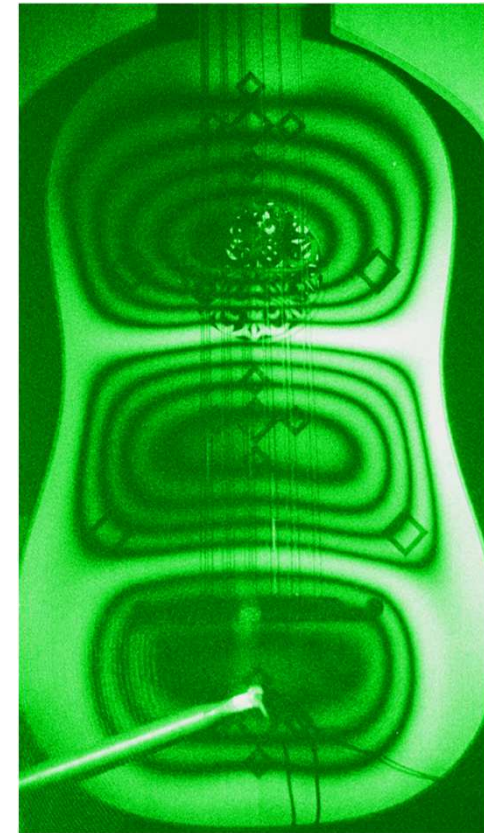


Σκέδαση (Scattering)



- **Μηχανισμός σκέδασης του φωτός**

- Σκέδαση του φωτός προκύπτει από την παρουσία ανομοιογενειών σε ένα υλικό
 - Φυσικά εγκλείσματα (inclusions)
 - Διακυμάνσεις στην διηλεκτρική σταθερά από τυχαία θερμική κίνηση
- Ανομοιογένεια / διακυμάνσεις → μη ομοιόμορφη χρονική / χωρική κατανομή του δείκτη διάθλασης στο υλικό
 - Ένα διερχόμενο ΕΜ κύμα θέτει ηλεκτρικά φορτία σε κίνηση ταλάντωσης και μπορεί να διεγείρει δονητικούς τρόπους (vibrational modes)
 - Το σκεδασμένο φως εκ νέου ακτινοβολείται από την επιτάχυνση των εν λόγω φορτίων ή / και χαλάρωση (relaxation) της δόνητικής μετάβασης



Σκέδαση (Scattering)



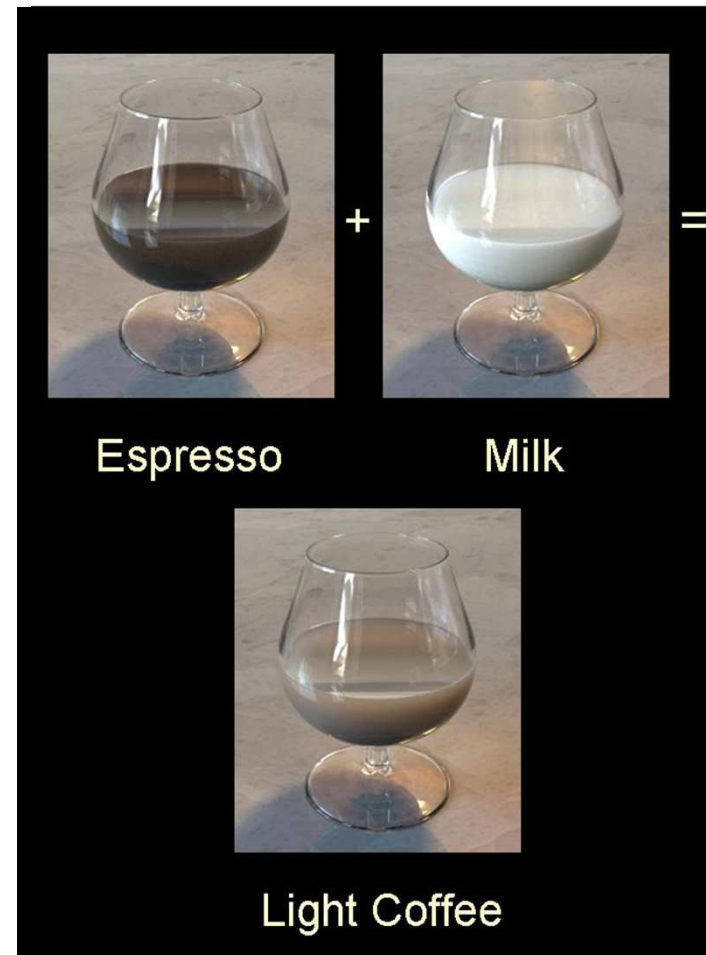
- **Ελαστική (Elastic) σκέδαση: καμία αλλαγή στην ενέργεια**
 - Συχνότητα του σκεδασμένου κύματος = συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος
 - Εξετάζει τη στατική δομή του υλικού
 - Rayleigh και Mie σκέδαση
- **Ανελαστική (Inelastic) σκέδαση : αλλαγή στην ενέργεια**
 - Συχνότητα του σκεδασμένου κύματος $\neq$ συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος
 - Διεγείρονται ενεργειακά επίπεδα ατόμων και μορίων
 - Εξετάζει τους δονητικούς δεσμούς (vibrational bonds) των μορίων
 - Σκέδαση Raman (stokes↓ και anti-stokes ↑)

Σκέδαση (Scattering)



Ελαστική (Elastic) σκέδαση

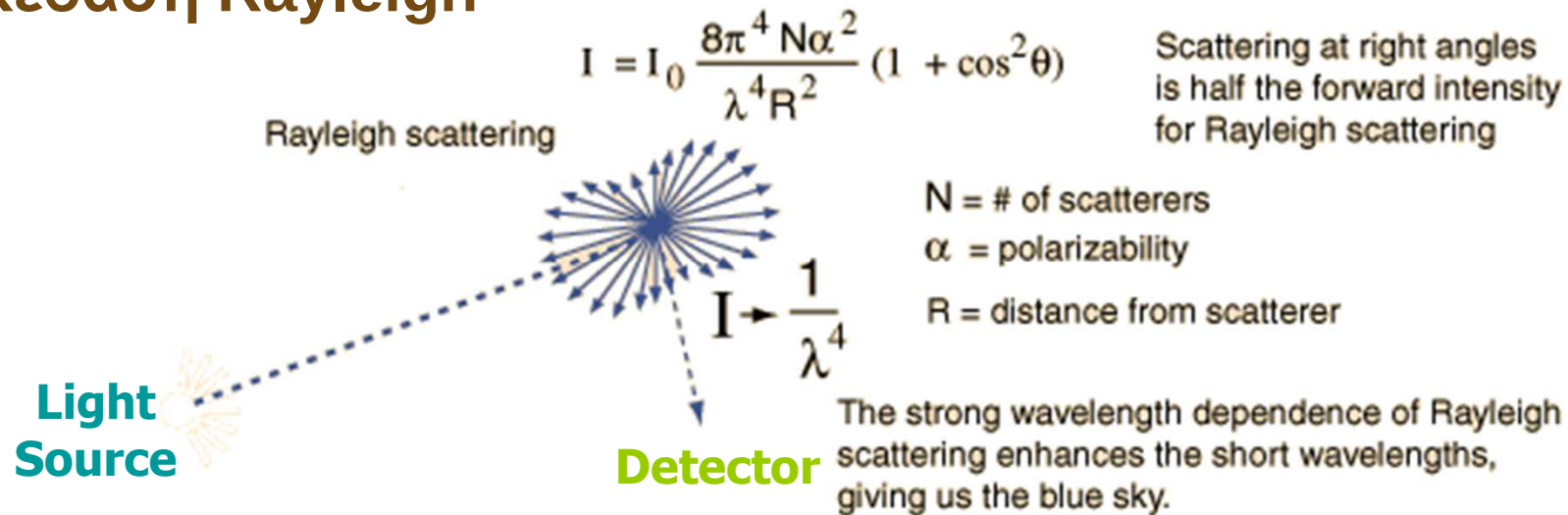
- Το φως που σκεδάζεται από ένα σύστημα αλληλεπιδρά με τις ανομοιογένειες του συστήματος
- Τα φωτόνια σκεδάζονται ως επί το πλείστον από δομές των οποίων το μέγεθος είναι της τάξης του μήκους κύματος
- Κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τη σκέδαση
 - Μήκος κύματος, λ
 - Σχετικός δείκτη διάθλασης
 - Μέγεθος των σωματιδίων
 - Σχήμα και προσανατολισμός
- Δύο τύποι σκέδασης: Rayleigh και Mie



Σκέδαση (Scattering)



Σκέδαση Rayleigh



- Σκέδαση από πολύ μικρά σωματίδια $\rightarrow \leq \lambda/10$
- Η σκέδαση Rayleigh είναι αντιστρόφως ανάλογη της 4^{ης} δύναμης του μήκους κύματος του προσπίπτοντος φωτός

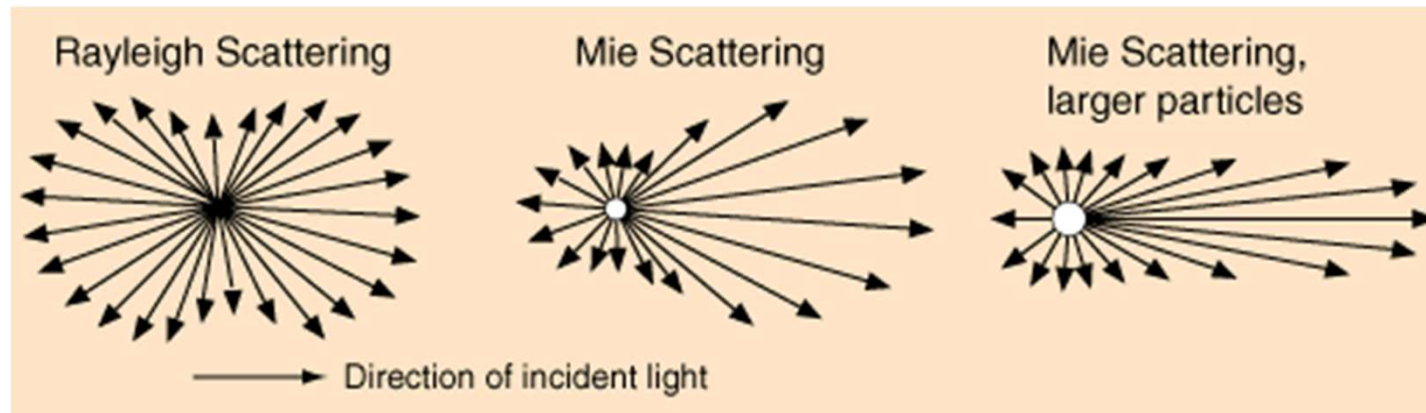
$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

λ είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός
 I είναι η ένταση του σκεδασμένου φωτός

Σκέδαση (Scattering)

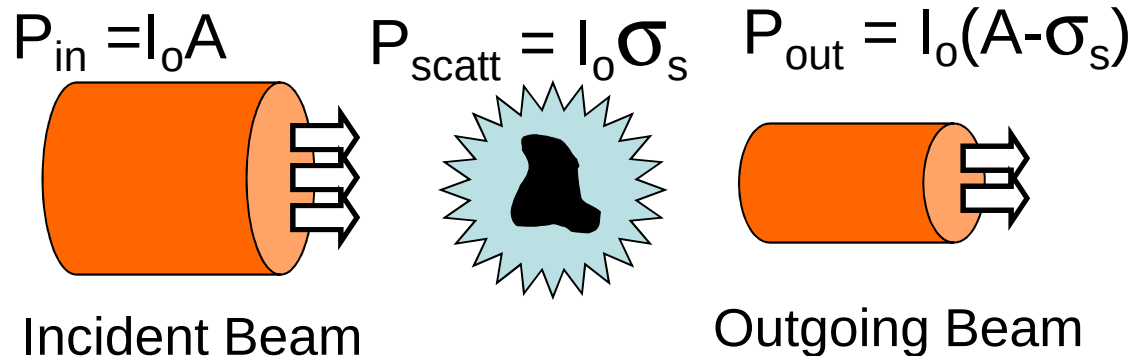


Σκέδαση Mie



- Σκέδαση από σωματίδια της τάξης ή και μεγαλύτερα από το μήκος κύματος → σκέδαση Mie κυριαρχεί
- Λόγω του σχετικού μεγέθους των σωματιδίων, η σκέδαση Mie δεν εξαρτάται σημαντικά από το μήκος κύματος
- Εμπρόσθια κατεύθυνση σκέδασης (forward scattering)

Σκέδαση (Scattering)



- **Διατομή (Cross Section) σκέδασης, σ_{scatt} [m²]**

- «Εμβαδό» δίσκου με τέλεια απορρόφηση και αντιστοιχισμένο δείκτη (index-matched), που απαιτείται για να επιφέρει τη μετρούμενη μείωση του φωτός

$$\sigma_{scatt} = Q_s * A_s$$

- Q_s : Απόδοση (efficiency) σκέδασης (όπως υπολογίζεται από τη θεωρία Mie); Ορίζεται ως ο λόγος της διατομής σκέδασης στη προβολή του εμβαδού του σωματιδίου στον ανιχνευτή (detector)
- A_s : Εμβαδό του σκεδαστή [m²]

Σκέδαση (Scattering)



- **Συντελεστής (Coefficient) σκέδασης, μ_s [1/m]**
 - $\mu_s = N_s \sigma_s$,
 - N_s = η αριθμητική πυκνότητα (number density) των σκεδαστών
 - σ_s = διατομή σκέδασης
 - Διατομή σκέδασης ανά μονάδα όγκου του υλικού
- **Μέση ελεύθερη διαδρομή (mean free path) σκέδασης, l_s [m]**
 - Η μέση απόσταση στην οποία ταξιδεύει ένα φωτόνιο μεταξύ σκεδασμών

$$l_s = \frac{1}{\mu_s}$$

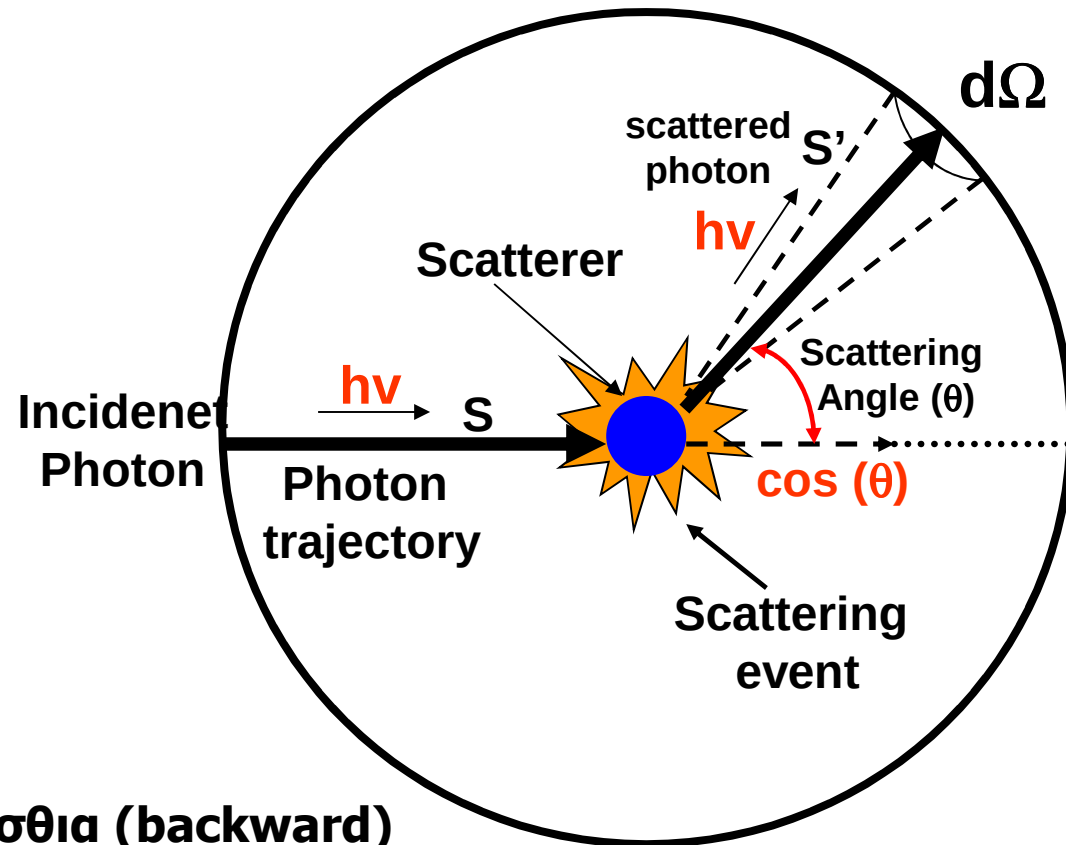
Σκέδαση (Scattering)



- **Ανισοτροπία (Anisotropy), g**

- Φανταστείτε ότι ένα φωτόνιο να σκεδάζεται από ένα σωματίδιο, έτσι ώστε η τροχιά του να εκτρέπεται κατά μια γωνία, θ
- Στη συνέχεια, η συνιστώσα της νέας πορείας, ευθυγραμμισμένη με τη κατεύθυνση προς τα εμπρός, είναι $\cos(\theta)$
- Ανισοτροπία είναι ένα μέτρο της διατήρησης της έμπροσθεν κατεύθυνσης μετά από ένα μεμονωμένο γεγονός σκέδασης, $\langle \cos(\theta) \rangle$

$$g = \begin{cases} -1 & \text{εξολοκλήρου οπίσθια (backward) σκέδαση} \\ 0 & \text{Ισοτροπική (isotropic) σκέδαση} \\ 1 & \text{εξολοκλήρου πρόσθια (forward) σκέδαση} \end{cases}$$



Βιολογικοί Ιστοί:
 $0.65 < g < 0.95$

Σκέδαση (Scattering)

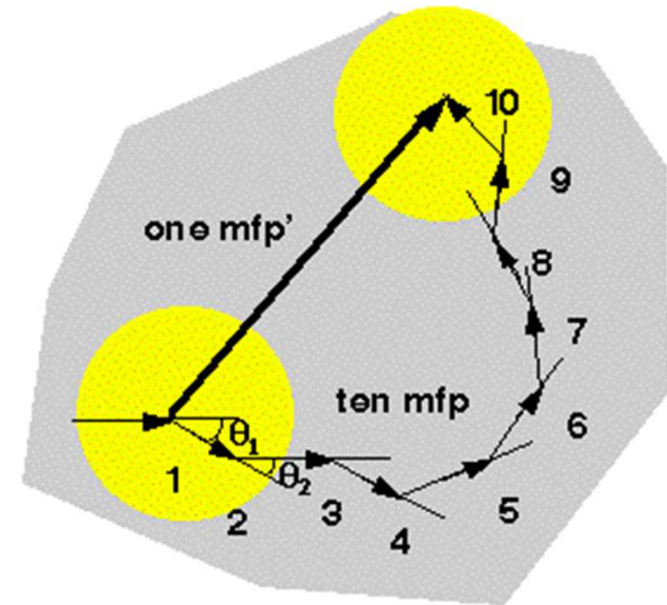


- **Μειωμένος Συντελεστής Σκέδαση, μ_s' [1/m]**

- Ο μ_s' ενσωματώνει τον συντελεστή σκέδασης, μ_s και τον συντελεστή ανισοτροπίας, g

$$\mu_s' = (1 - g)\mu_s$$

- Ο μ_s' μπορεί να θεωρηθεί ως **ένας ισοδύναμος (effective) ισοτροπικός συντελεστής σκέδασης** που αντιπροσωπεύουν το σωρευτικό αποτέλεσμα των διαφόρων πρόσθιων σκεδάσεων
- Είναι ιδιαίτερα σημαντικός στη θεωρία διάχυσης φωτόνιων



$$\langle \theta \rangle \approx 26^\circ$$

$$g = \langle \cos \theta \rangle = 0.90$$

$$\mu_s' = (1 - g)\mu_s = 0.10\mu_s$$

$$mpf = 1 / \mu_s$$

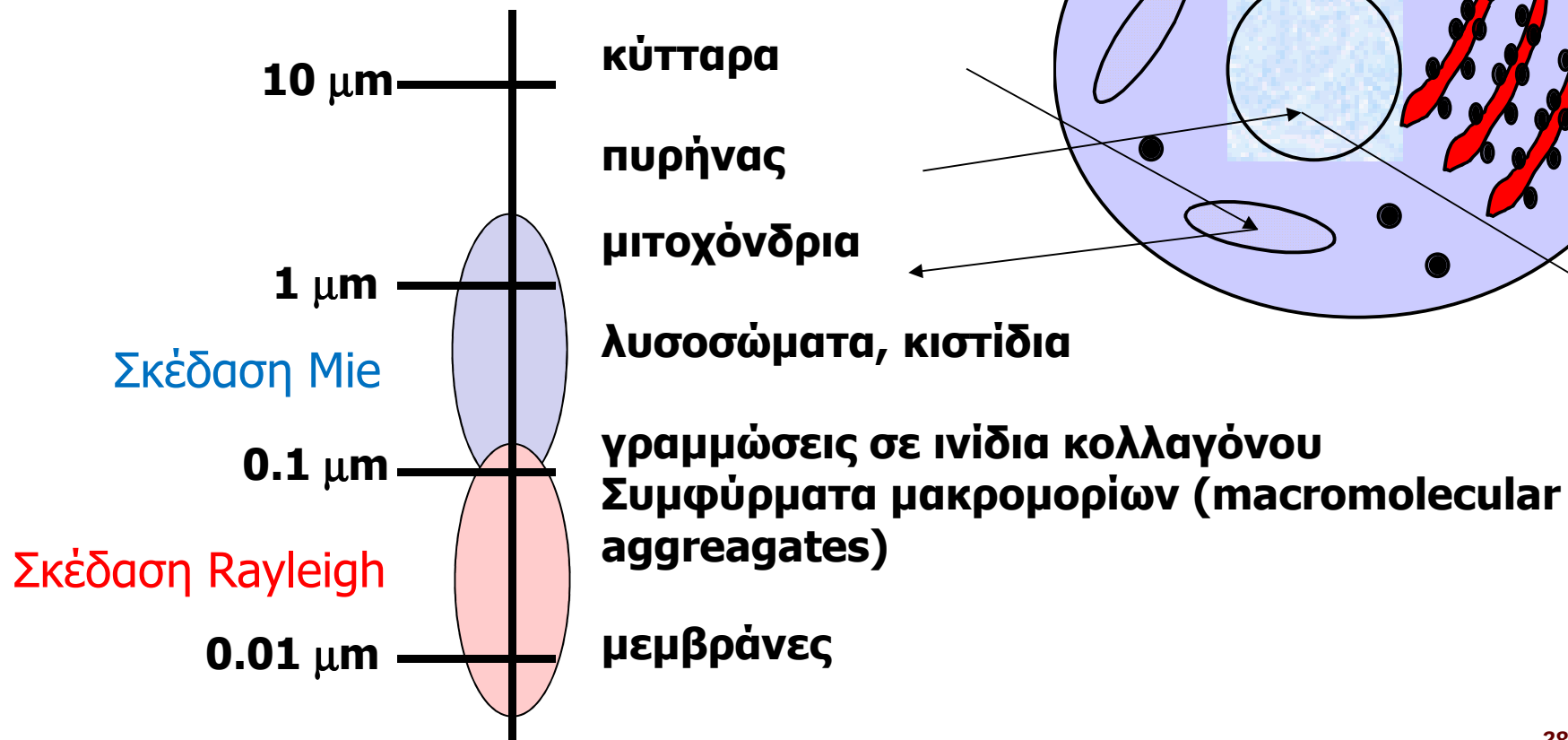
$$mpf' = 1 / \mu_s' = 10mpf = 10 / \mu_s$$

Σκέδαση (Scattering)



- **Σκέδαση στους ιστούς**

- Από τους ιστούς βγαίνει ένα “μείγμα” Rayleigh και Mie σκέδασης

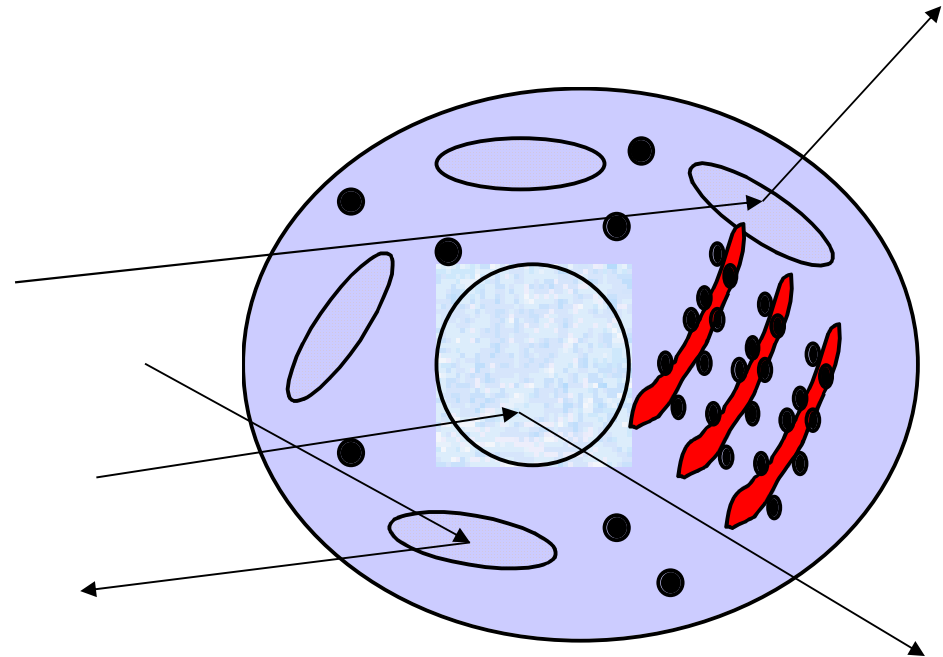


Σκέδαση (Scattering)



- **Σκέδαση στους ιστούς**

- Διαφορές στο δείκτη διάθλασης (refractive index) ανάμεσα στα λιπίδια και το περιβάλλον υγρό υλικό
 - Οι μαλακοί ιστοί αποτελούνται από κυρίως λιπίδια
 - Κυτταρικές μεμβράνες, αναδιπλώσεις μεμβράνης, και μεμβρανώδεις δομές
- Μιτοχόνδρια (Mitochondria), $\sim 1\mu\text{m}$
 - Ενδοκυτταρικά οργανίδια αποτελούμενα από πολύ αναδιπλωμένες μεμβράνες (cristae)
- Ίνες Κολλαγόνων (Collagen fibers), $2 \sim 3\mu\text{m}$
 - Ινίδια Κολλαγόνων, $0.3\mu\text{m}$
 - Περιοδικές διακυμάνσεις στη μικροδομή του κολλαγόνου $\rightarrow$ σκέδαση Rayleigh στο UV και Visible
- Κύτταρα, $8-10\mu\text{m}$ και μεγαλύτερα



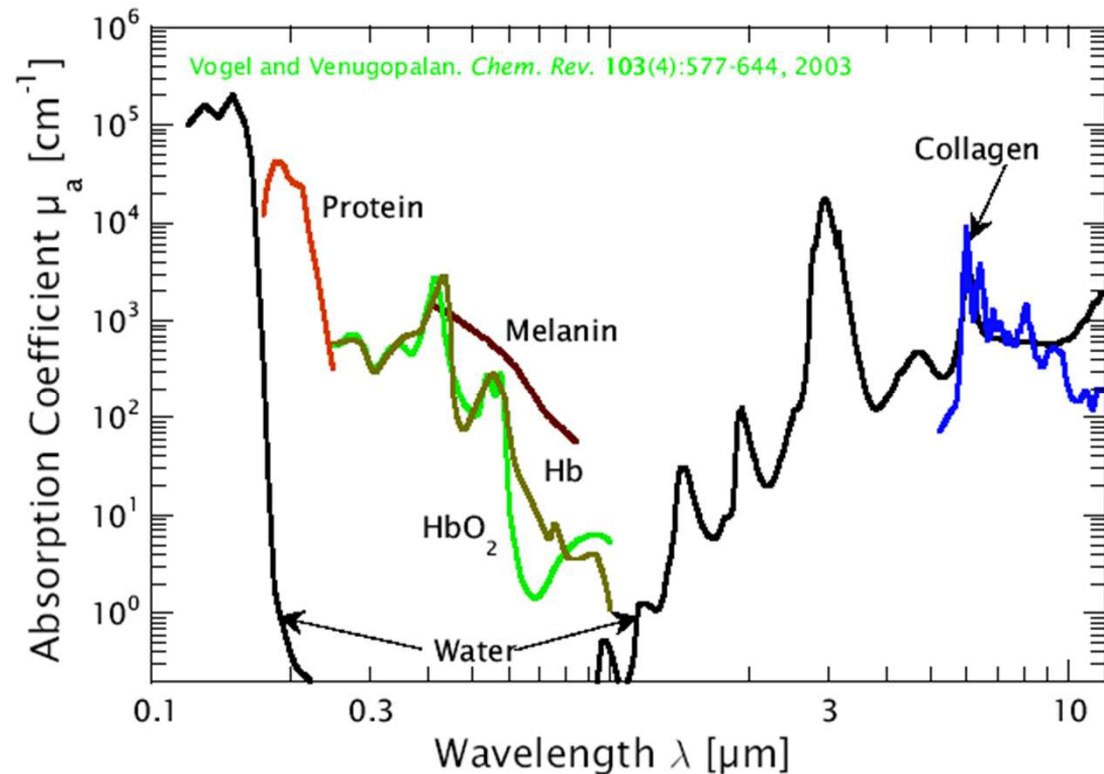
Διάδοση φωτός στους ιστούς



- Σκέδαση και απορρόφηση συμβαίνουν ταυτόχρονα και εξαρτώνται από το μήκος κύματος

$$\mu_t = \mu_s' + \mu_a$$

- Η σκέδαση μειώνεται μονοτονικά με το μήκος κύματος
- Η απορρόφηση είναι μεγάλη στο UV, κοντικό ορατό, και IR
- Η απορρόφηση είναι χαμηλή στο κόκκινο και το NIR → Θεραπευτικό παράθυρο (Therapeutic window): $600 \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$



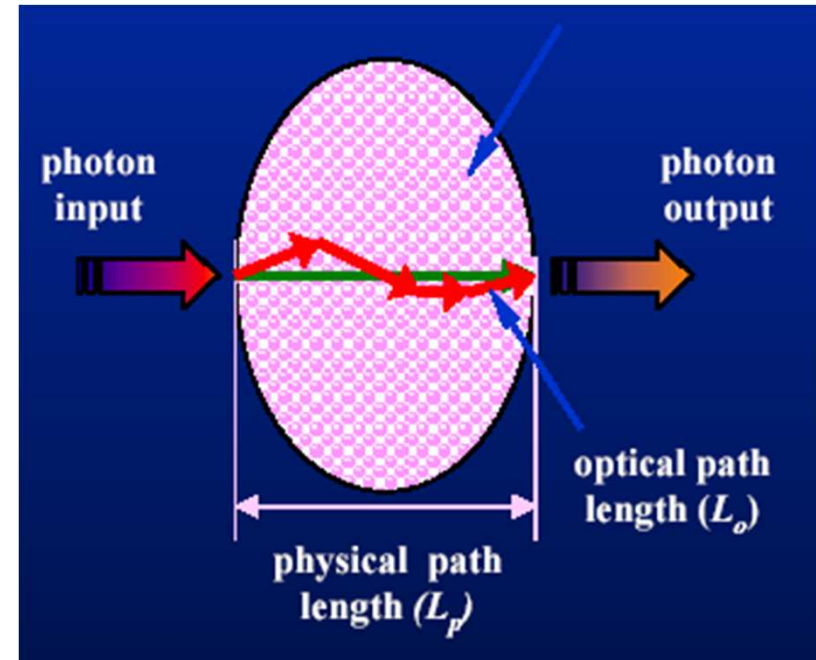
$$\mu_s' = A \cdot \lambda^{-b}$$

$$\mu_s' \sim \lambda^{-0.5} - \lambda^{-4}$$

Διάδοση φωτός στους ιστούς



- Μοντελοποίηση της διάδοσης του φωτός διέπονται από το σχετικό μέγεθος της απορρόφησης και της σκέδασης
 - $\mu_a \gg \mu_s'$: Νόμος του Lambert-Beer ($\lambda \leq 300\text{nm}; \lambda \geq 2000\text{nm}$)
 - $\mu_s' \gg \mu_a$: Προσέγγιση Διάχυσης (Diffusion Approximation) (600nm ~ 1000nm)
 - $\mu_s' \sim \mu_a$: Εξίσωση Μεταφοράς Ακτινοβολίας (Equation of Radiative Transfer), Monte Carlo (300nm ~ 600 nm; 1000nm ~ 2000nm)
- Χρήση Monte Carlo, Θεωρία Μεταφοράς (Transport Theory), ή Θεωρία Διάχυσης (Diffusion Theory)



Physical Pathlength: L_p

Optical Pathlength: L_o

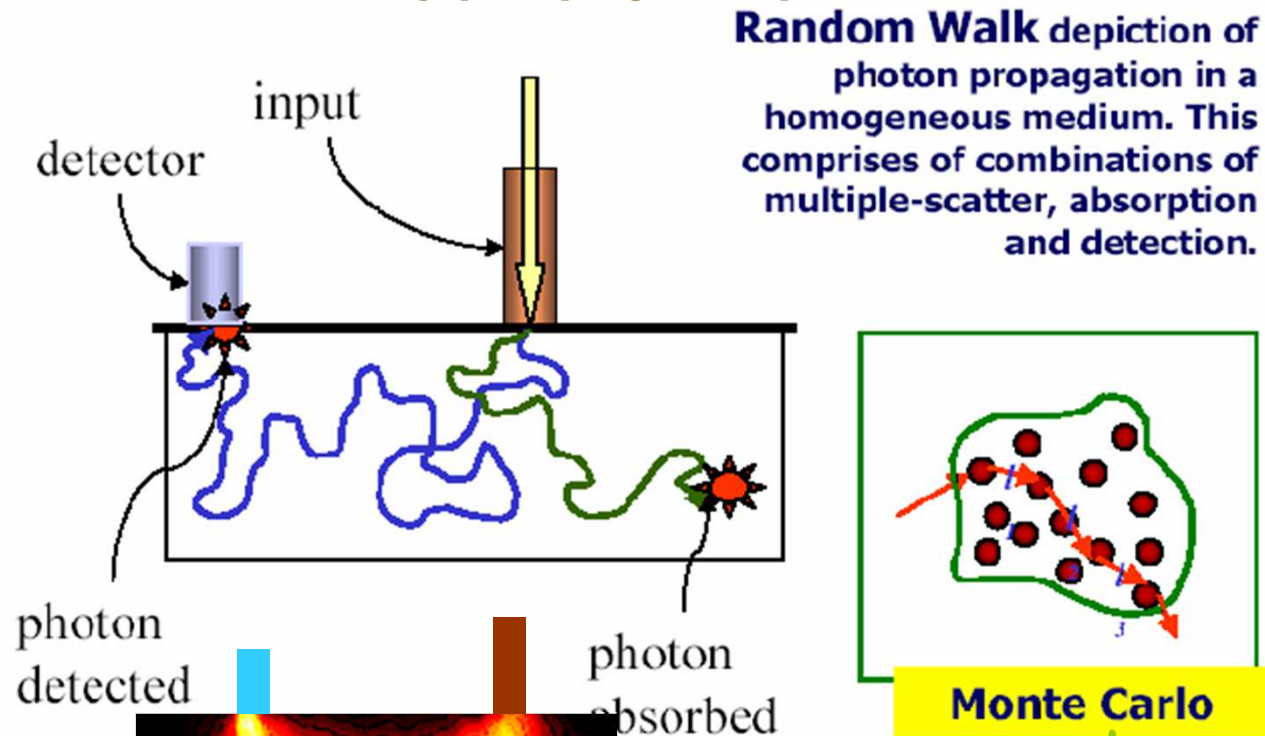
Biological Tissue

$L_o/L_p = 4$ or $\uparrow$

Διάδοση φωτός στους ιστούς



- Μοντελοποίηση Διάδοσης (Propagation) Φωτονίων



μ_a , μ_s , g , phase function S
“Stochastic” Description

Διάδοση φωτός στους ιστούς



- **Θεωρία Μεταφοράς Ακτινοβολίας (Radiative Transport Theory)**

- Η άμεση εφαρμογή της EM θεωρίας είναι περίπλοκη
- RTT ασχολείται με τη μεταφορά της φωτεινής ενέργειας
- RTT αγνοεί κυματικά φαινόμενα (πόλωση, παρεμβολές) της EMT

Steady State Radiative Transport Equation

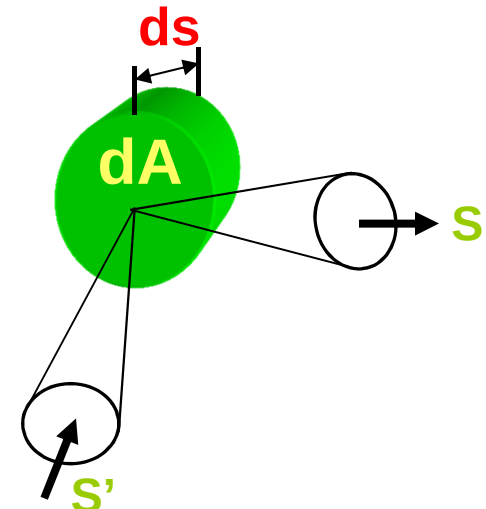
$$\frac{\partial L(\vec{r}, \hat{\Omega})}{\partial s} = -(\mu_a + \mu_s)L(\vec{r}, \hat{s}) + \mu_s \int_{4\pi} p(\hat{s}, \hat{s}') L(\vec{r}, \hat{s}') d\hat{s}' + S(\vec{r}, \hat{s})$$

Overall Energy balance at position r and direction s

Loss due to scatt and abs

gain due to scattering from s' to s at r

Source term



L = radiance [$\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}$], propagation of photon power

$P(s, s')$ = phase (scattering) function

s, s' = directional vectors of photon propagation

Διάδοση φωτός στους ιστούς



- **Προσέγγιση Διάχυσης (Diffusion Approximation)**

- Απλοποιημένη μορφή RTT για το “όριο διάχυσης” (“diffusion limit”)
- $\mu_s' \gg \mu_a$
 - Ο αριθμός των φωτονίων που υφίστανται τυχαίους περιπάτους (random walks) είναι μεγάλος

$$\partial j(\vec{r}, t) / \partial t \ll c(\mu_a + \mu_s') = c\mu_t'$$

$$L(\vec{r}, \hat{s}, t) \approx \frac{1}{4\pi} \phi(\vec{r}, t) + \frac{3}{4\pi} \vec{j}(\vec{r}, t) \cdot \hat{s}$$

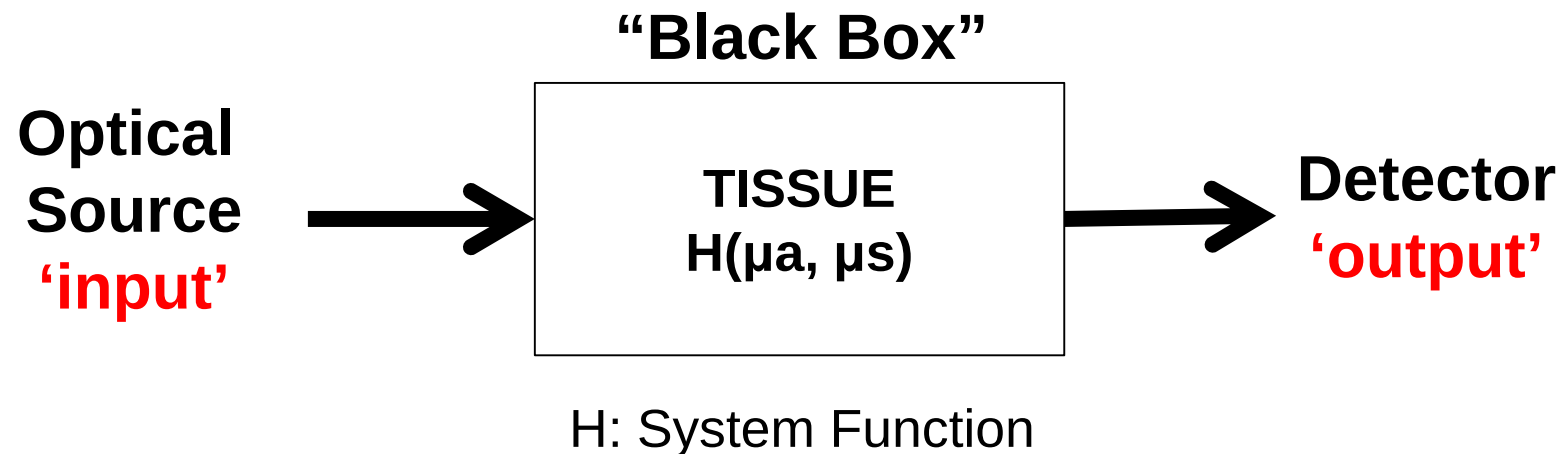
- Ισοτροπική πηγή (Isotropic source) για πάνω από $1/\mu_t'$
 - $\sim 10/\mu_t'$ ($\sim 1\text{mm}$ στους βιολογικούς ιστούς)
 - Μακριά από πηγές και όρια (boundaries)
 - Ο ιστός θεωρείται “μακροσκοπικά ομοιογενής” (“macroscopically homogeneous”)

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \phi(\vec{r}, t)}{\partial t} - \nabla \cdot D(\vec{r}) \nabla \phi(\vec{r}) - \mu_a \phi(\vec{r}, t) = S(\vec{r}, t)$$

$$\text{where } D(\vec{r}) = 1/3 [\mu_a(\vec{r}) + \mu_s(\vec{r})]$$



- Μέθοδοι Μέτρησης



- Στόχος: Να υπολογιστεί το $H(\mu_a, \mu_s)$
- Απαιτείται μη-στατικό (δυναμικό) σύστημα → Διαταραχές (Perturbations) είτε της πηγής είτε του ιστού

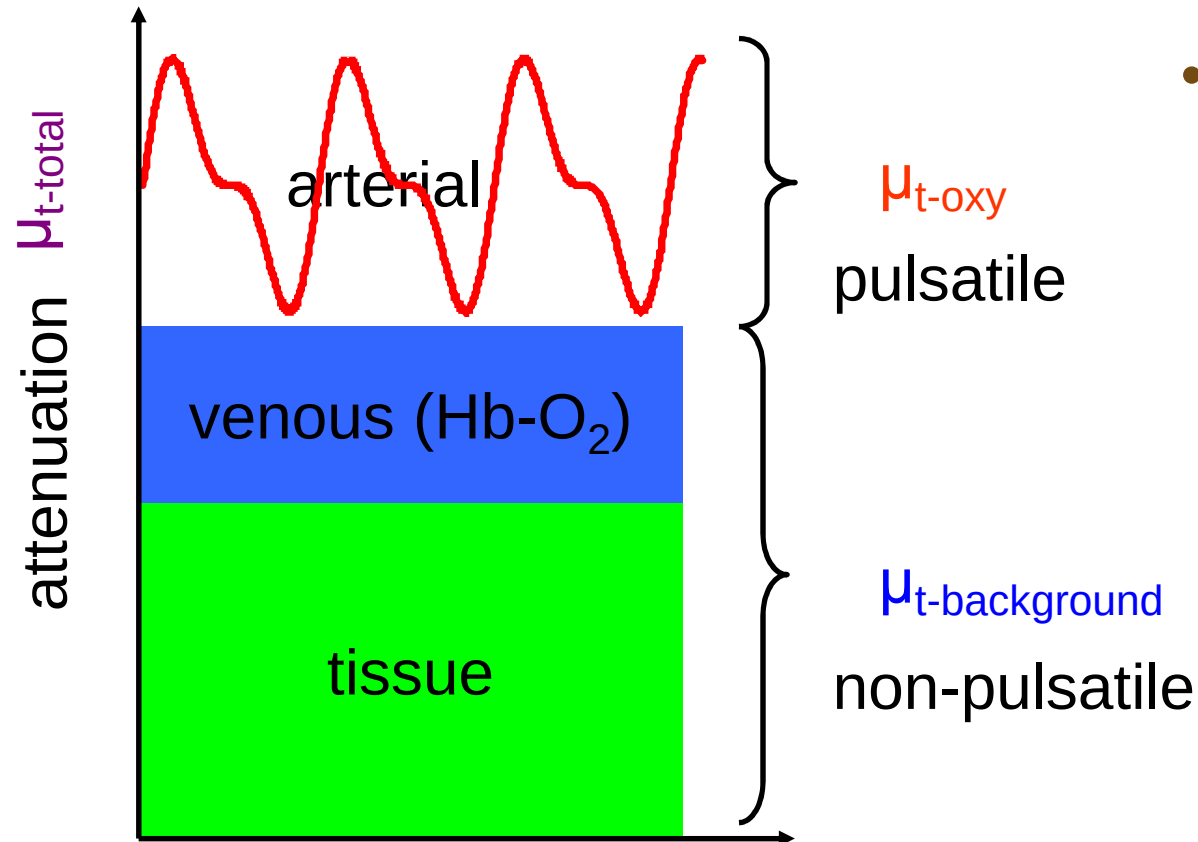
Οπτικές Ιδιότητες των Ιστών



Μέθοδοι Μέτρησης

- **Μετρήσεις με Συνεχές Κύμα (CW - Continuous Wave)**
 - Απλούστερες μορφές μέτρησης
 - Στατικές, συνεχές κύμα
 - Απαραίτητες δυναμικές αλλαγές στις ιδιότητες του ιστού
 - π.χ. σφυγμική οξυμετρία (pulse oximetry)
- **Μετρήσεις Χρονικής Ευκρίνειας (Time-Resolved)**
 - Οπτικές αλλαγές της πηγής στο χρόνο
 - Διάδοση Φωτονίων στο πεδίο του Χρόνου (Time Domain Photon Migration (TDPM))
 - Διάδοση Φωτονίων στο πεδίο της Συχνότητας (Frequency Domain Photon Migration (FDPM))
- **Μετρήσεις Χωρικής Ευκρίνειας (Spatially-Resolved)**
 - Οπτικές αλλαγές της πηγής στο χώρο (Spatial)

Οπτικές Ιδιότητες των Ιστών



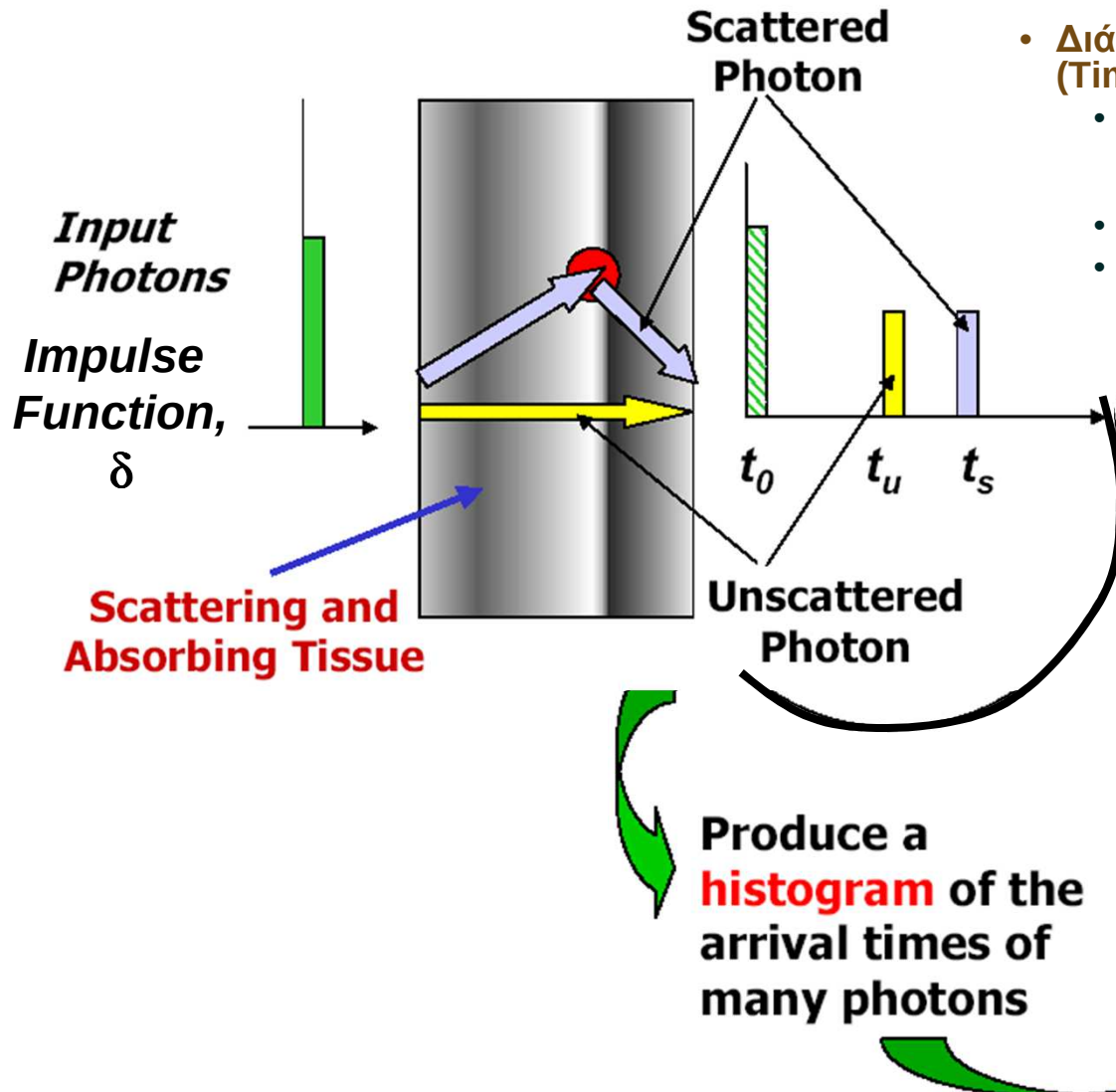
• Συνεχές Κύμα (CW - continuous wave)

- Σφυγμική Οξυμετρία (pulse oximetry) “κλειδώνει” στον παλμό
- Βαθμονόμηση (calibration) σε ενήλικες αντισταθμίζουν τη σκέδαση (μ_s)
- Συνήθως σε 2 μήκη κύματος (660, 940 nm)

$$\mu_t = \mu_a + \mu_s'$$

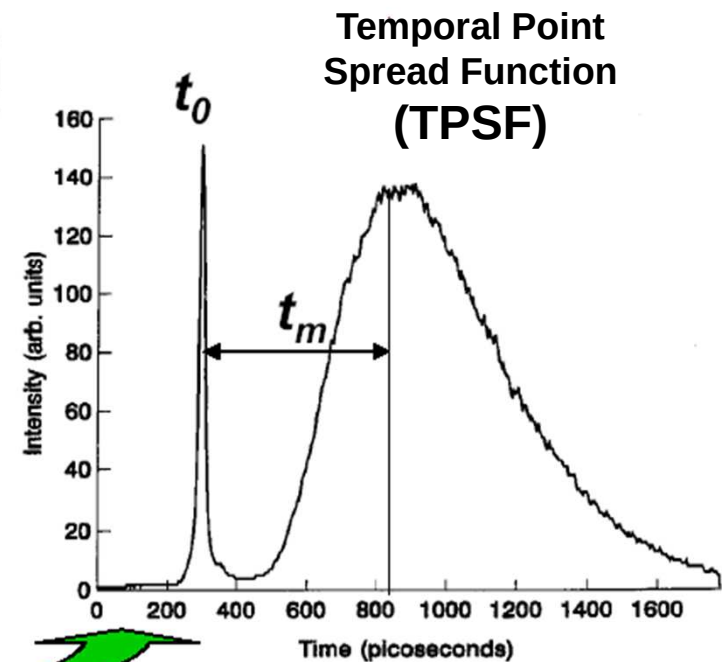
?

Οπτικές Ιδιότητες των Ιστών



- **Διάδοση Φωτονίων στο πεδίο του Χρόνου (Time Domain Photon Migration (TDPM))**

- Μετρά απευθείας τα μ_a και μ_s από το Χρονική Συνάρτηση Μεταφοράς Σημείου (TPSF) με τη Εξίσωση Διάχυσης (Diffusion Equation)
- Πολύπλοκο και ακριβό σύστημα ανίχνευσης
- Χαμηλό SNR



Οπτικές Ιδιότητες των Ιστών



- Διάδοση Φωτονίων στο πεδίο της συχνότητας
Frequency Domain Photon Migration (FDPM)

