



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

# Φωτοσύνθεση (ΒΙΟΛ-440)

## 1<sup>η</sup> Ενότητα

### Εισαγωγή στη φωτοσύνθεση

**Κοτζαμπάσης Κυριάκος**

**Καθηγητής**

**Τμήμα Βιολογίας**

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.



## Σημείωμα αδειοδότησης

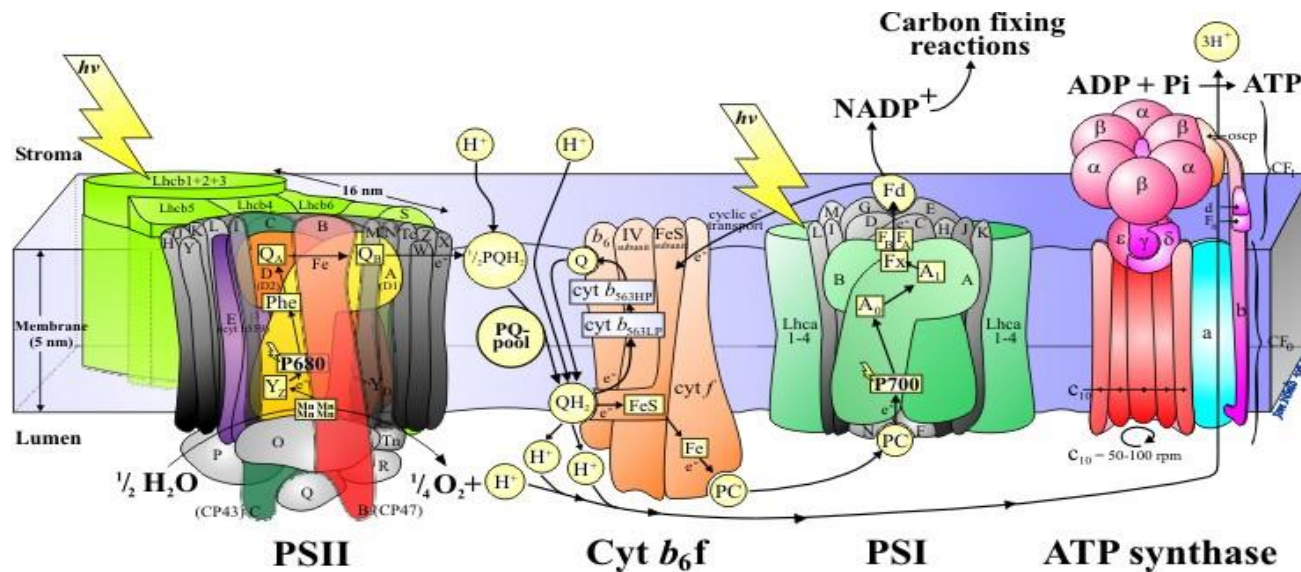
- Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων (π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π.), τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί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



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

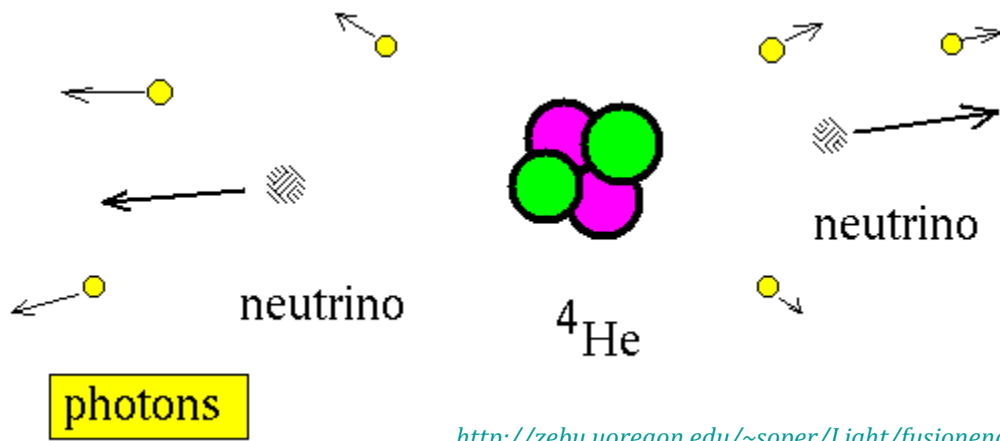
- Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:
  - που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
  - που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
  - που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου 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.

# ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ



Υπεύθυνος Καθηγητής: Καθ. Κυριάκος Κοτζαμπάσης





<http://zebu.uoregon.edu/~soper/Light/fusionend.gif>

εν αρχή ην το φως

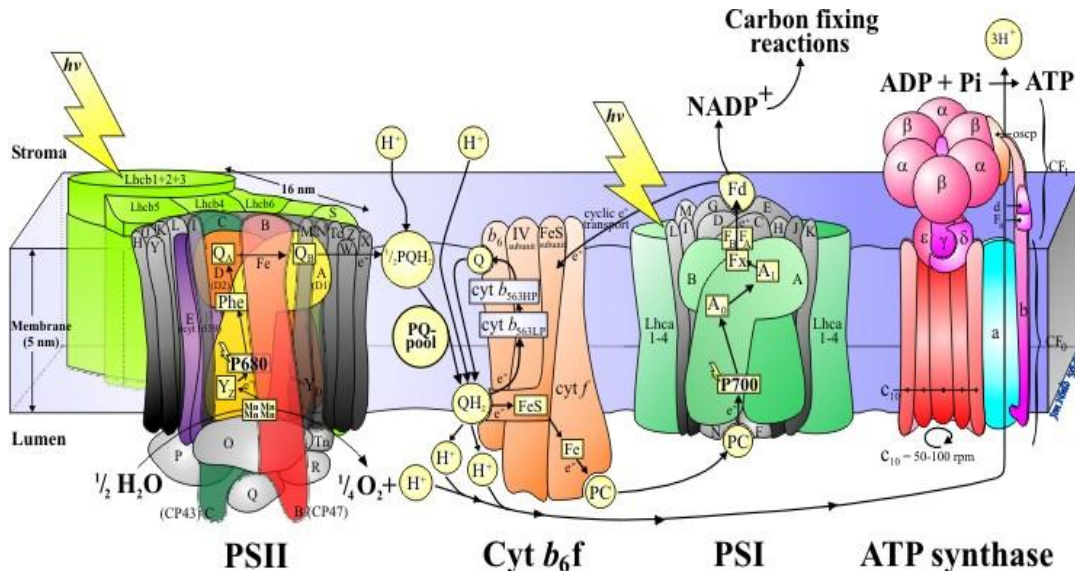
<http://blog.gigg.com/wp-content/uploads/2013/12/SuperNova-pic.jpg>



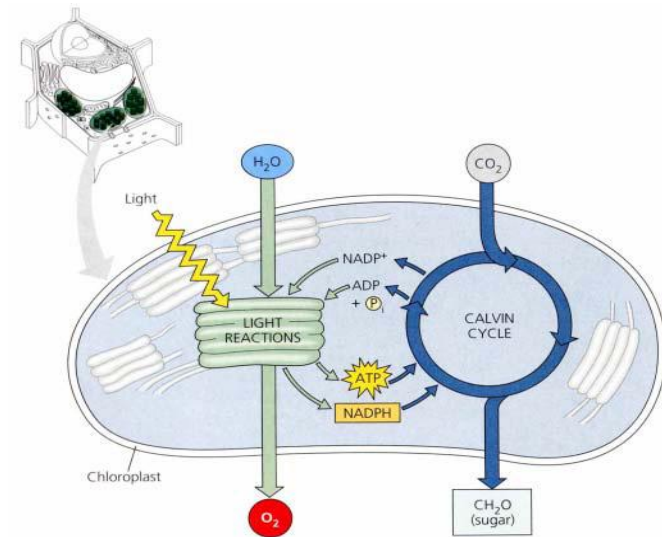
**Φωτοσύνθεση** είναι η φυσικοχημική διαδικασία μέσω της οποίας τα φυτά και τα φωτοσυνθετικά βακτήρια χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να συνθέσουν οργανικές ενώσεις. Στα φυτά και σε ορισμένα είδη βακτηρίων, η φωτοσυνθετική διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση οξυγόνου και τη δέσμευση από την ατμόσφαιρα  $\text{CO}_2$ , το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύνθεση υδατανθράκων (οξυγονική φωτοσύνθεση). Άλλα είδη βακτηρίων χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να συνθέσουν οργανικές ενώσεις, αλλά δεν παράγουν οξυγόνο (ανοξυγονική φωτοσύνθεση). Η οξυγονική φωτοσύνθεση στα φυτά μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια:

Τις **“φωτεινές αντιδράσεις”**, οι οποίες περιλαμβάνουν την απορρόφηση του φωτός, τη μεταφορά της ενέργειας στα φωτοσυνθετικά κέντρα αντίδρασης και τις αντιδράσεις μεταφοράς ηλεκτρονίων και πρωτονίων οι οποίες οδηγούν στην παραγωγή NADPH, ATP και  $\text{O}_2$ .

Και τις **“σκοτεινές αντιδράσεις”** οι οποίες περιλαμβάνουν την αναγωγή του  $\text{CO}_2$  και τη σύνθεση υδατανθράκων, χρησιμοποιώντας το NADPH και το ATP τα οποία παράγονται κατά τις φωτεινές αντιδράσεις.



Φωτεινές αντιδράσεις



Σκοτεινές αντιδράσεις



Ετήσια παραγωγή οργανικού άνθρακα  
μέσω φωτοσύνθεσης  
**75.000.000.000 t /year**

Το 99% της βιομάζας στη γη προέρχεται από τη φωτοσυνθετική διαδικασία και υπολογίζεται ότι ανέρχεται στους  $1,87 \cdot 10^{12}$  τ ξηρής μάζας. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή φωτοσυνθετικά δεσμευμένου άνθρακα φτάνει τους  $75 \cdot 10^9$  t. Το 32% αυτής της παραγωγής λαμβάνει χώρα στις θάλασσες και τους ωκεανούς, το 64% στην ξηρά και το υπόλοιπο 4% στους ποταμούς και τις λίμνες. Από τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι η φωτοσύνθεση αποτελεί τον μοναδικό γήινο μηχανισμό δέσμευσης και μετατροπής ενός αστείου, για τα ανθρώπινα δεδομένα, εξωγήινου ενεργειακού παράγοντα (ηλιακή ενέργεια), δίνοντας άμεσα (αυτότροφοι οργανισμοί) ή έμμεσα (ετερότροφοι οργανισμοί) την δυνατότητα ζωής στον πλανήτη μας για πάρα πολλά χρόνια.

Video 1 – Photosynthesis (overview):

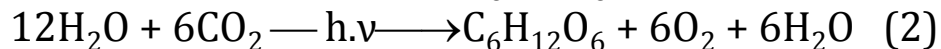
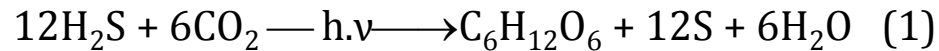
<http://www.youtube.com/watch?v=g78utcLQrJ4>

Video 2 – Photosynthesis (overview):

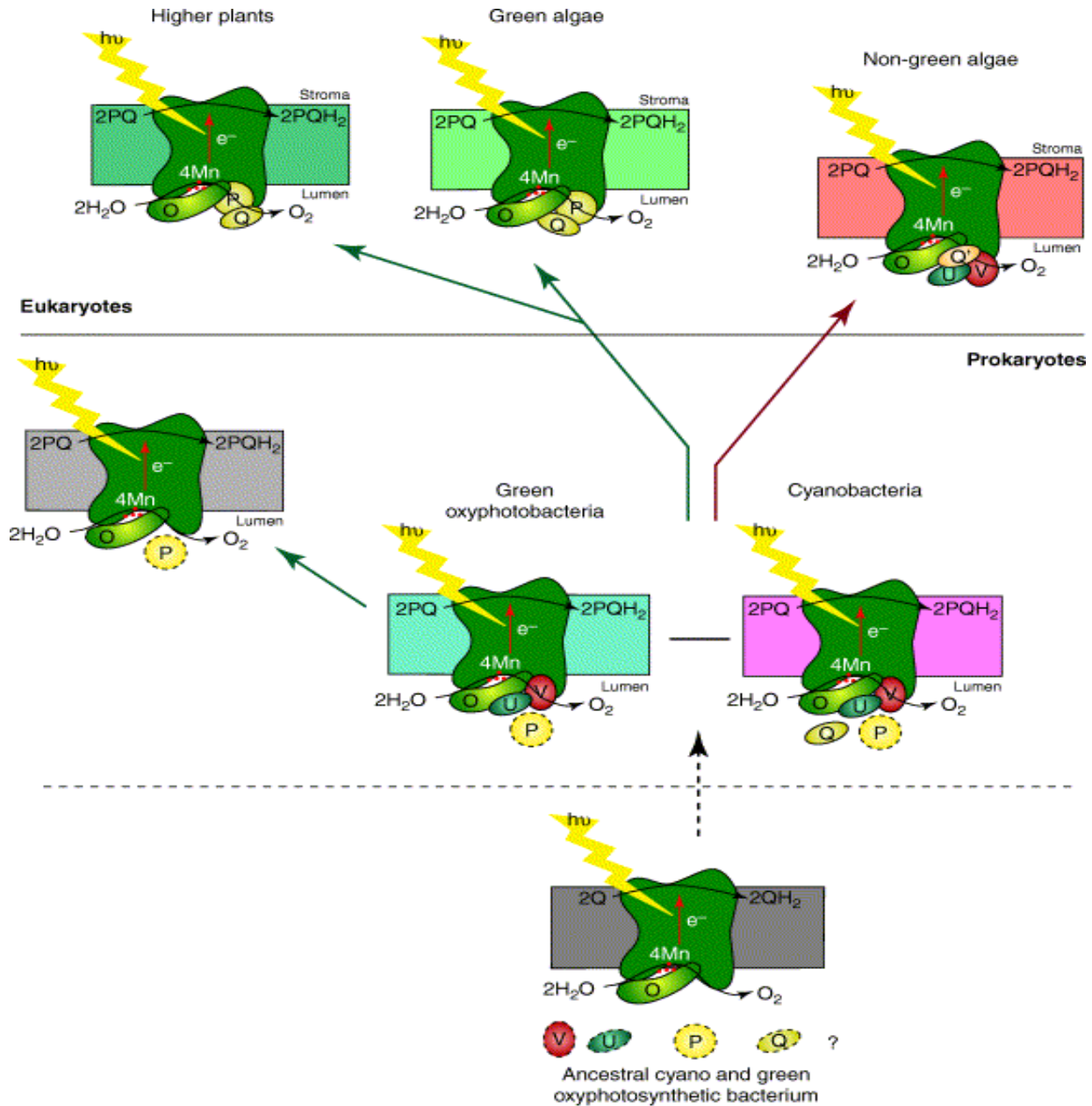
<http://www.youtube.com/watch?v=gXCEbuqC4SQ>

## ➤ Βιολογική εξέλιξη και φωτοσύνθεση

Σύμφωνα με τα μέχρι στιγμής επιστημονικά δεδομένα, ο πλανήτης μας δημιουργήθηκε πριν από περίπου  $4,6 \cdot 10^9$  χρόνια. Η ατμόσφαιρα που κάλυπτε τότε τον πλανήτη μας, περιείχε κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, άζωτο, υδρόθειο, υδροκυάνιο και υδρατμούς. Οι πρώτοι οργανισμοί, που αναπτύχθηκαν, ήταν ετερότροφοι και επιζούσαν εκμεταλλεύμενοι τα υπάρχοντα οργανικά αποθέματα. Πριν περίπου  $3 \cdot 10^9$  χρόνια κάποια βακτήρια, που ζούσαν μέχρι τότε ετερότροφα και σε αναερόβιες συνθήκες (η ατμόσφαιρα δεν περιείχε οξυγόνο), κατάφεραν να δεσμεύσουν και να εκμεταλλευτούν την ηλιακή ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό ανεξαρτητοποιήθηκαν από τα οργανικά αποθέματα του πλανήτη και συνεπώς απέκτησαν πλεονέκτημα επιβίωσης (κινητήρια δύναμη της εξέλιξης των οργανισμών σύμφωνα και με την θεωρία του Δαρβίνου). Οι πρώτοι αυτοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί χρησιμοποίησαν, ως πρωτογενή ηλεκτρονιοδότη στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, το υδρόθειο (1). Πολύ αργότερα, εμφανίσθηκαν φωτοσυνθετικοί οργανισμοί, που χρησιμοποιούν τα μόρια του νερού ως πρωτογενείς ηλεκτρονιοδότες κατά τις “φωτεινές αντιδράσεις”, απελευθερώνοντας κατά την φωτοσυνθετική διαδικασία οξυγόνο ως παραπροϊόν (2). Έτσι, η ατμόσφαιρα εμπλουτίστηκε σε οξυγόνο, γεγονός, που συντέλεσε στη δημιουργία του στρατοσφαιρικού μανδύα όζοντος ( $O_3$ ). Η προσπίπτουσα UVB ακτινοβολία πλέον φιλτράρεται και δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την ανάπτυξη ποικίλων μορφών ζωής στον πλανήτη μας, τόσο στη θάλασσα όσο και στην ξηρά. Επίσης ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας σε  $O_2$  έδωσε τη δυνατότητα για την εξέλιξη της αναπνοής με τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων το  $O_2$ .

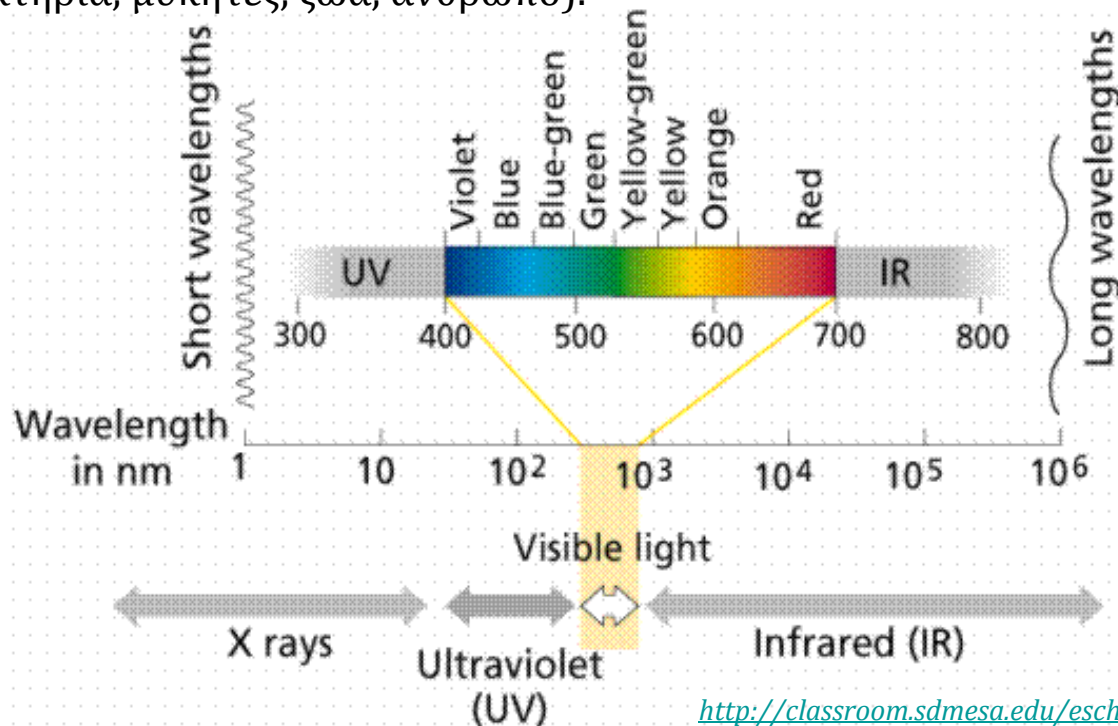


# Εξελικτική διαδικασία της συγκρότησης του Φωτοσυστήματος II



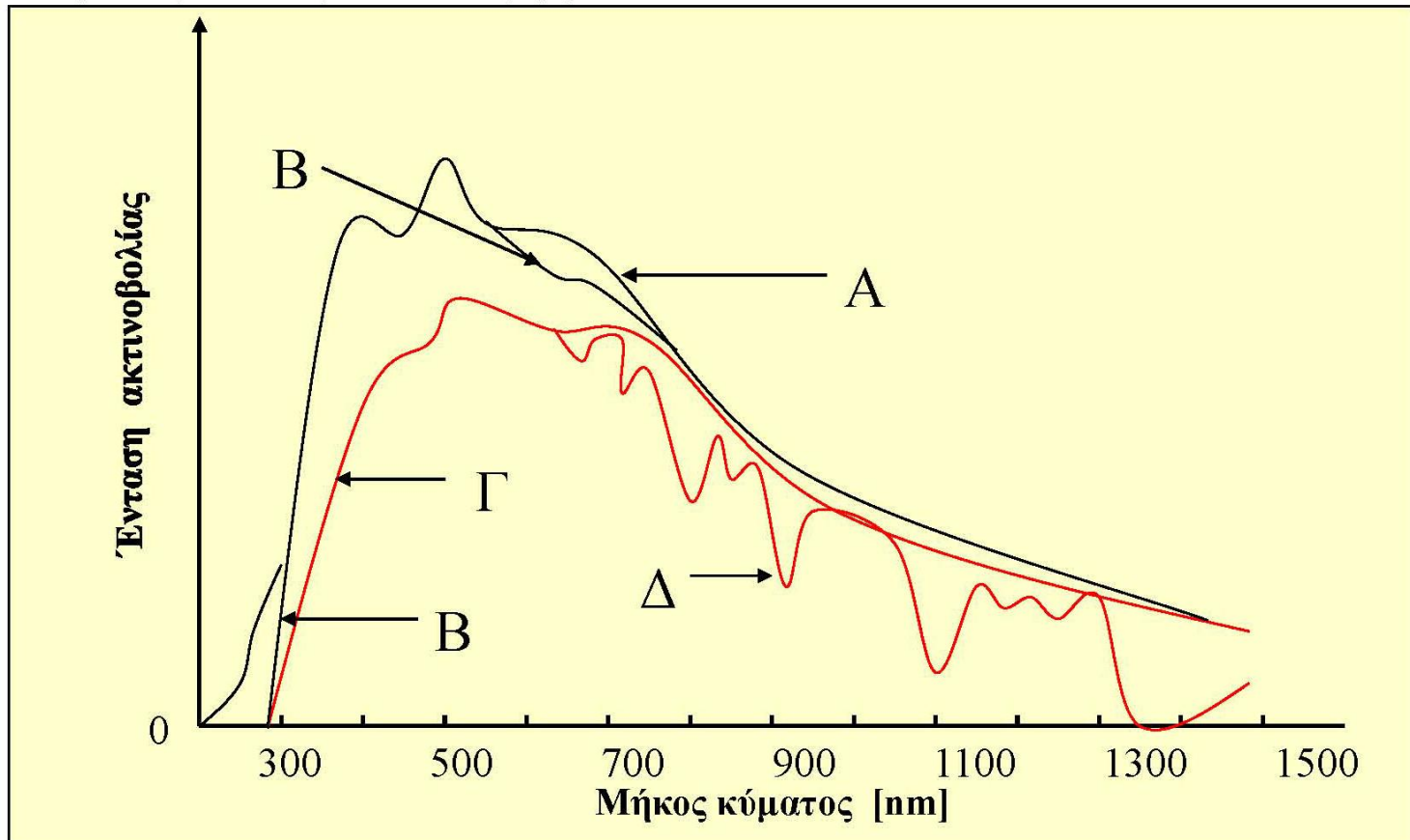
## ➤ Φωτοσύνθεση και ενεργειακή ροή

Η δυνατότητα ύπαρξης της βιόσφαιρας προϋποθέτει μια συνεχή παροχή ενέργειας. Πηγή αυτής της ενέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή καθ'εαυτή η ακτινοβολία θα ήταν ουσιαστικά άχρηστη, εάν δεν υπήρχε ο κατάλληλος μηχανισμός μετατροπής της ενεργειακής μορφής σε μια άλλη εκμεταλλεύσιμη από την βιόσφαιρα. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε χημική επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Με την σειρά της, αυτή η χημική ενέργεια χρησιμοποιείται (τις περισσότερες φορές μη αντιστρεπτά), σε μία σειρά από μεταβολικά μονοπάτια και κατ' επέκταση σε μια σειρά βιολογικών διαδικασιών του οργανισμού, όπως η αύξηση, η ανάπτυξη, η αναπνοή, η κίνηση κ.α. Η κατανάλωση ενέργειας από τους οργανισμούς απαιτεί τη συνεχή ροή ηλιακής ενέργειας στο οικοσύστημα, η οποία δεσμεύεται από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς και διοχετεύεται έμμεσα στους υπόλοιπους ετερότροφους οργανισμούς (βακτήρια, μύκητες, ζώα, άνθρωπο).





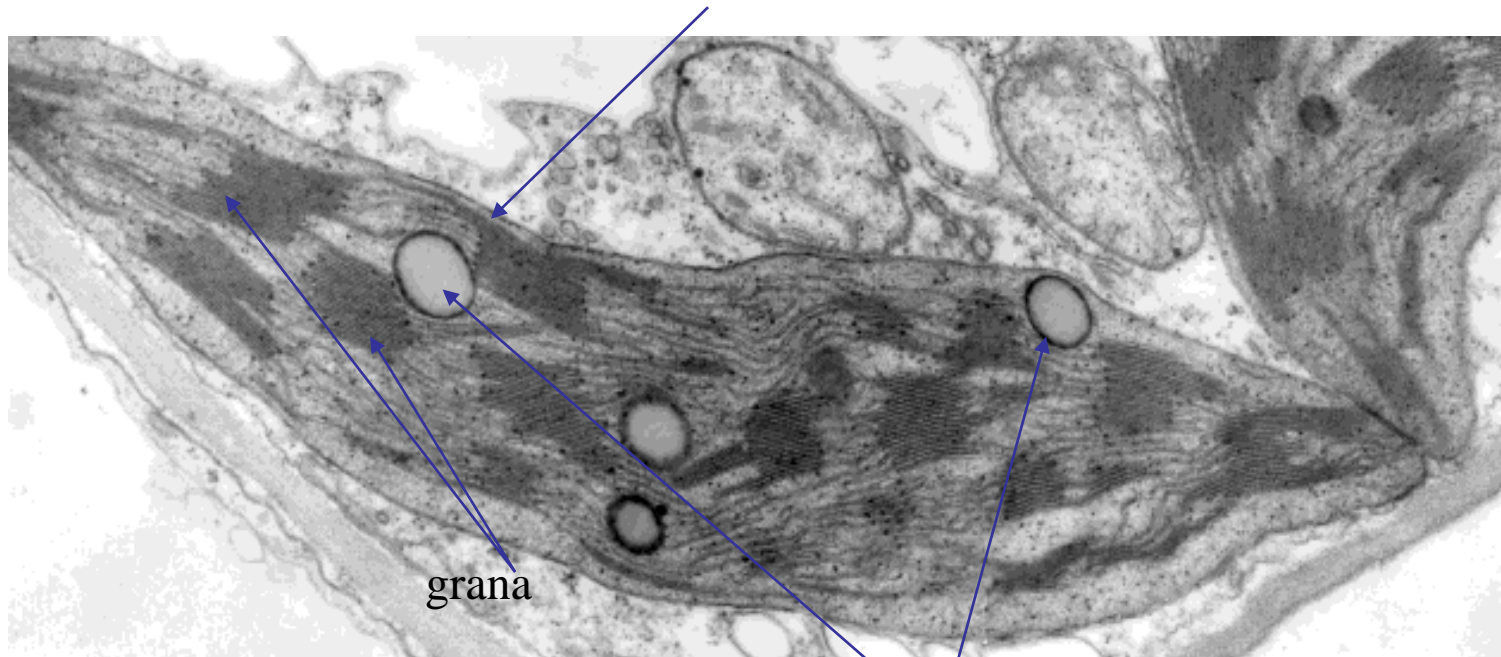
Η ροή ενέργειας στο πλανητικό μας οικοσύστημα εξαρτάται άμεσα από τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και αυτή με τη σειρά της από τη δυνατότητα δέσμευσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παρόλο ότι η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αλλάζει κατά την διάρκεια της ημέρας, αλλά και των εποχών, έχει βρεθεί ότι κατά μέσο όρο θα έφτανε την ένταση των **1370 J.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>** αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα και η στρατόσφαιρα. Είναι γνωστό ότι τμήματα του ηλιακού φάσματος (περίπου το 40% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) απορροφούνται επιλεκτικά από την στρατόσφαιρα (B) και από την ατμόσφαιρα (Δ). Από το υπόλοιπο 60%, μόνο ένα μικρό τμήμα του προσπίπτει πάνω σε φωτοσυνθετικούς οργανισμούς και μόνο το 5% αυτής της ακτινοβολίας είναι εκμεταλλεύσιμη φωτοσυνθετικά.



## ➤ Χλωροπλάστες

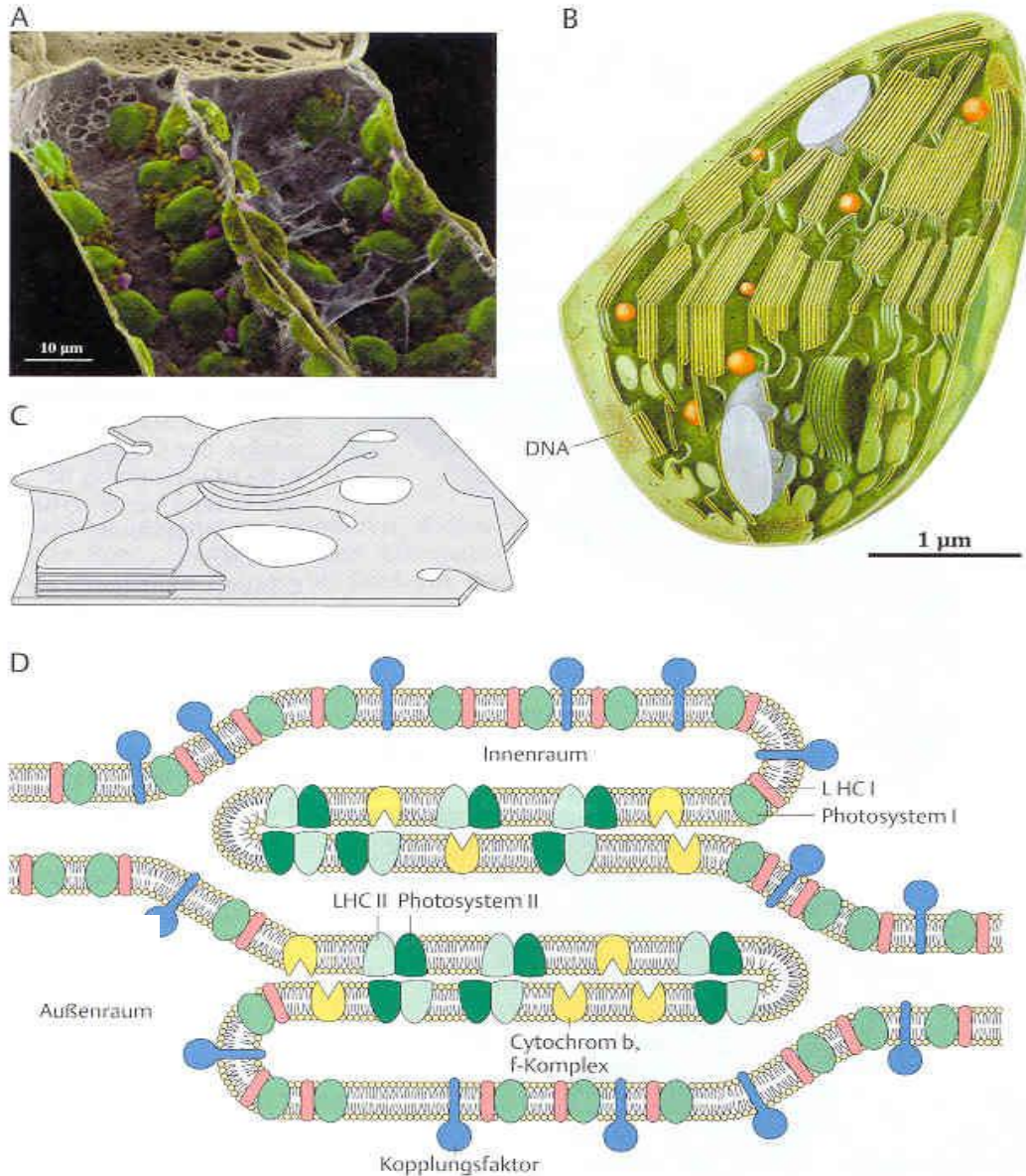
Ο φωτοσυνθετικός μηχανισμός των φυτών εντοπίζεται μέσα σε ειδικά οργανίδια του κυττάρου, τους **χλωροπλάστες**. Ο χλωροπλάστης περιβάλλεται από μια διπλή μεμβράνη, τον πλαστιδιακό φάκελο. Το θεμελιώδες υλικό του πλαστιδίου ονομάζεται **στρώμα**. Τα περισσότερα ένζυμα, που καταλύουν τις σκοτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης βρίσκονται στο στρώμα, όπου υπάρχει αναπτυγμένο σύστημα μεμβρανών, που αποτελεί συνέχεια της εσωτερικής μεμβράνης του πλαστιδιακού φακέλου. Οι αναδιπλώσεις αυτές ονομάζονται **ελασμάτια** ή **lamellae**. Σε κανονικά διαστήματα, τα ελασμάτια διαπλατώνονται και δημιουργούν μεμβρανώδεις σάκκους, τα **θυλακοειδή**, που περιέχουν ένα εσωτερικό χώρο, γνωστό ως **lumen** ή **μικροχώρο**. Τέλος, τα θυλακοειδή οργανώνονται σε μεμβρανικές στοιβάδες οι οποίες καλούνται **grana**.

Πλαστιδιακός φάκελος



Αμυλόκοκκοι

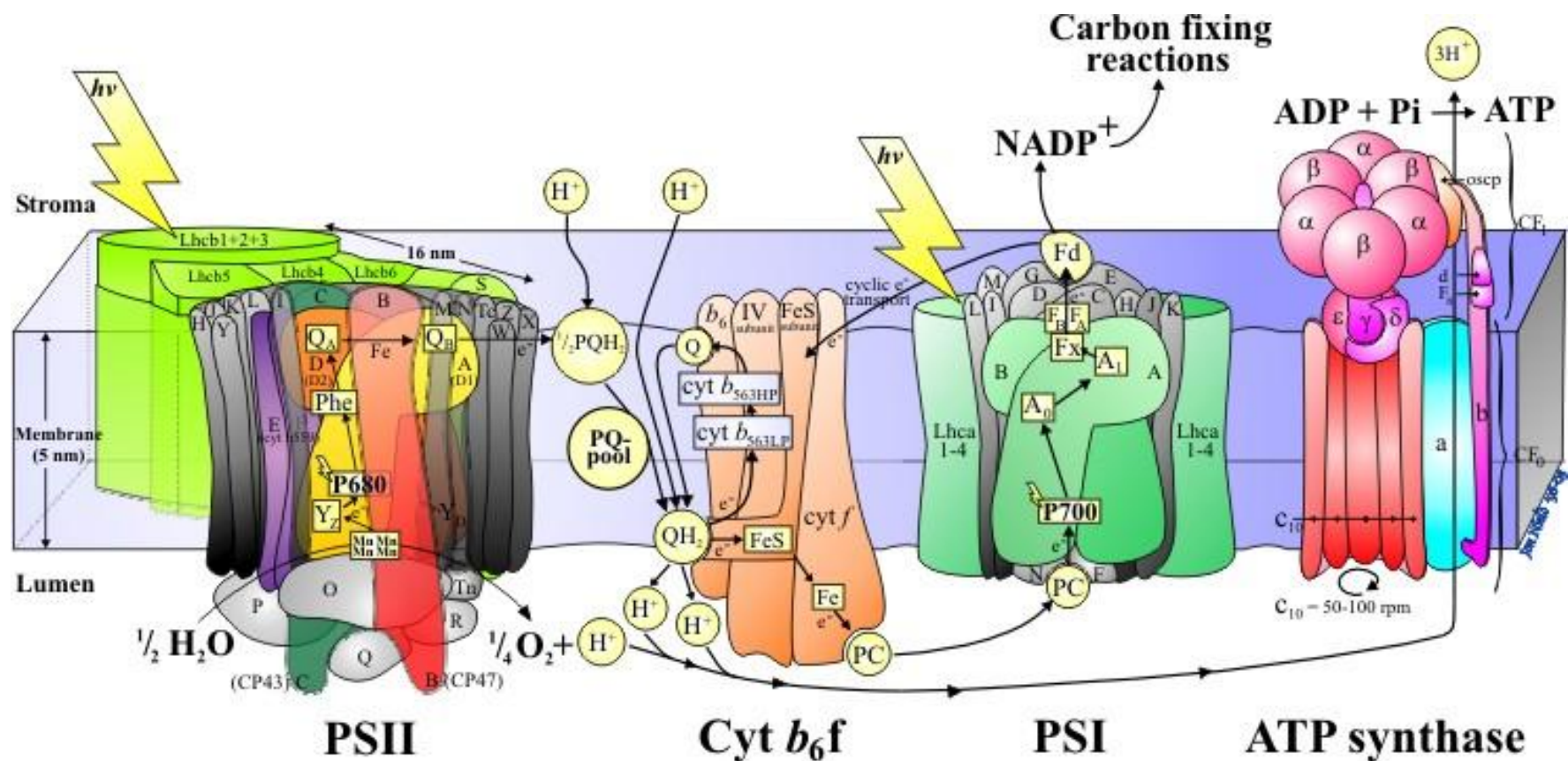
Οι φωτοσυνθετικές μονάδες βρίσκονται στις μεμβράνες των θυλακοειδών και αποτελούνται από πρωτεΐνες και φωτοσυνθετικές χρωστικές (χλωροφύλλες και καροτενοειδή) οργανωμένες σε σύμπλοκα χρωστικών/πρωτεϊνών.



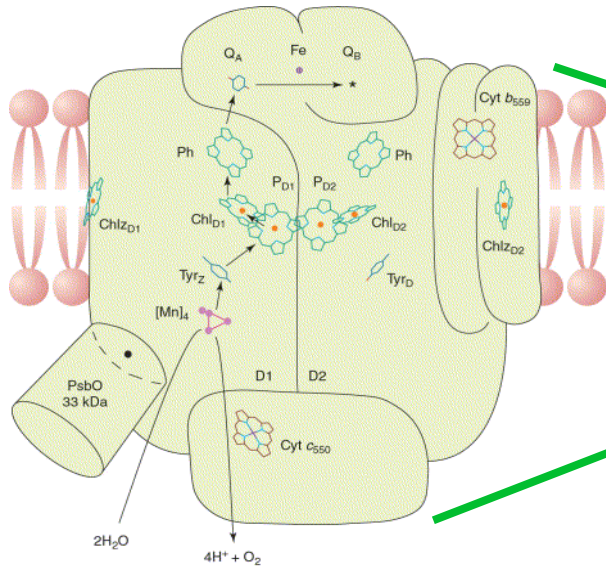


## ➤ Λειτουργική Οργάνωση της Φωτοσυνθετικής Μονάδας

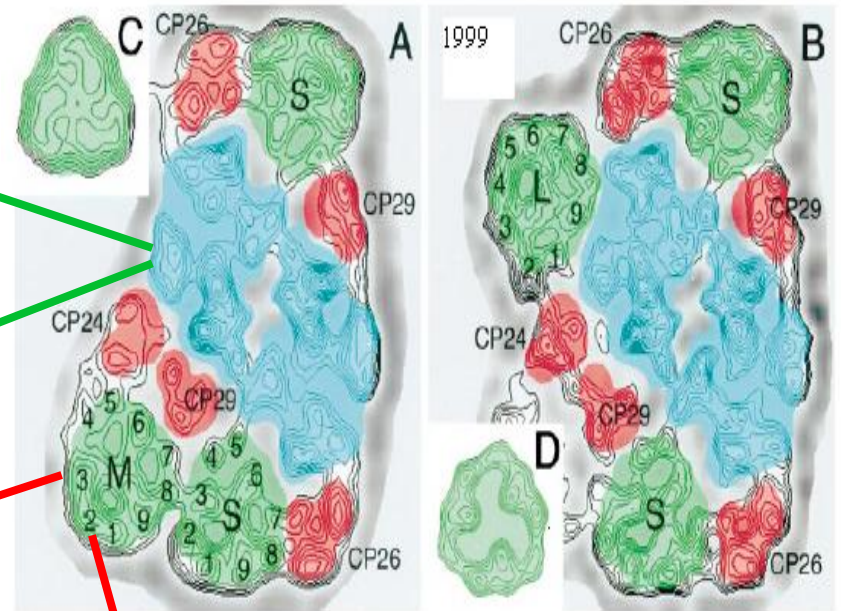
Δομική περιγραφή του φωτοσυνθετικού μηχανισμού. Η φωτοσυνθετική μονάδα αποτελείται από τρία κύρια σύμπλοκα χρωστικών/πρωτεϊνών [Φωτοσύστημα II και το σύμπλοκο συλλογής φωτός (PS II / LHC II), το σύμπλοκο του κυττοχρώματος b<sub>6</sub>/f (Cytb<sub>6</sub>/f) και το φωτοσύστημα I με το αντίστοιχο σύμπλοκο συλλογής φωτός (PS I / LHC I) και από το σύμπλοκο της ATPάσης]. Τα βέλη υποδηλώνουν την μη κυκλική και κυκλική ροή ηλεκτρονίων και πρωτονίων κατά την φωτοσυνθετική διαδικασία.



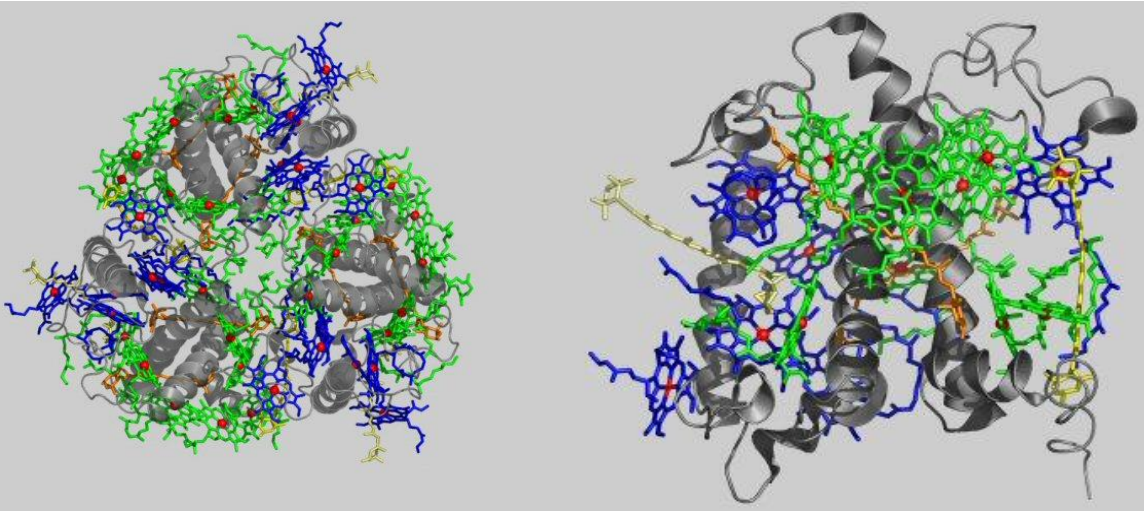
## Δομικό Μοντέλο του PSII-RC



## Δομικό Μοντέλο του PSII/LHCII



## Δομικό Μοντέλο του LHCII

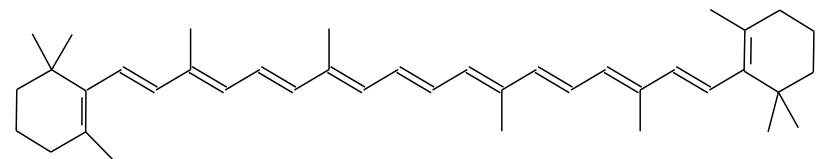
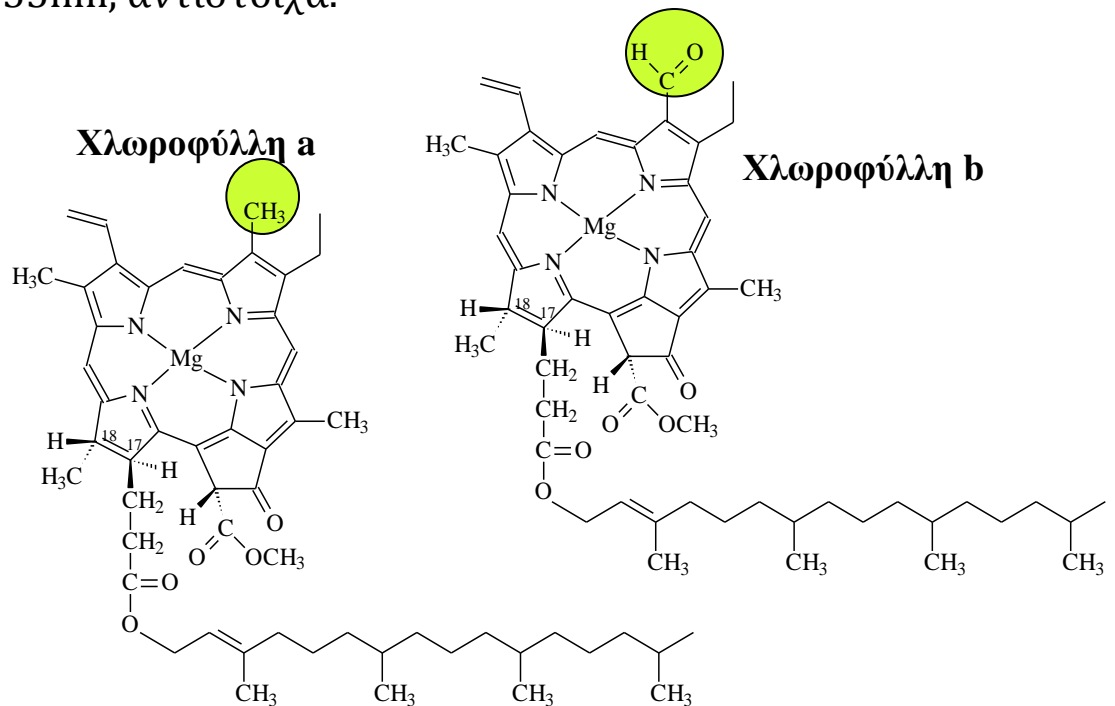


Structural model of LHCII as determined by Lui et al (Nature 428, 287-292, 2004).  
 A. Trimer viewed from its stromal surface  
 B, monomeric subunit. Chlorophyll a (green), chlorophyll b (blue), xanthophylls (yellow).

## ➤ Φωτοσυνθετικές χρωστικές

Όλοι οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί περιέχουν οργανικές ενώσεις, τις χρωστικές, οι οποίες έχουν την ικανότητα να απορροφούν την ορατή ακτινοβολία. Οι δυο κύριες κατηγορίες φωτοσυνθετικών χρωστικών, που συναντώνται στα ανώτερα φυτά είναι οι χλωροφύλλες και τα καροτενοειδή. Οι χλωροφύλλες (**χλωροφύλλη a** και **b**) είναι οι χρωστικές, οι οποίες δίνουν στα φυτά το χαρακτηριστικό πράσινο χρώμα. Η χλωροφύλλη a είναι πράσινη ενώ η χλωροφύλλη b είναι κιτρινο-πράσινη. Τα μέγιστα απορρόφησης της χλωροφύλλης a και της χλωροφύλλης b σε ακετόνη είναι 663/430nm και 645/455nm, αντίστοιχα.

Τα καροτενοειδή είναι κίτρινες και πορτοκαλί χρωστικές οι οποίες βρίσκονται σε όλα τα φωτοσυνθετικά κύτταρα. Τα καροτενοειδή περιέχουν συζυγιακά συστήματα διπλών δεσμών. Είναι συνήθως είτε υδρογονάνθρακες (**καροτένια**) ή οξυγονωμένοι υδρογονάνθρακες (**ξανθοφύλλες**), οι οποίοι περιέχουν αλυσίδες 40 ατόμων άνθρακα



**β-καροτένιο**



# Φάσματα Απορρόφησης των Φωτοσυνθετικών Χρωστικών

