



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Φωτοβιολογία (ΒΙΟΛ-463)

3^η Ενότητα

Φωτορύθμιση μεταβολικών
μονοπατιών, Φωτομορφογενετικές
αποκρίσεις

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/>

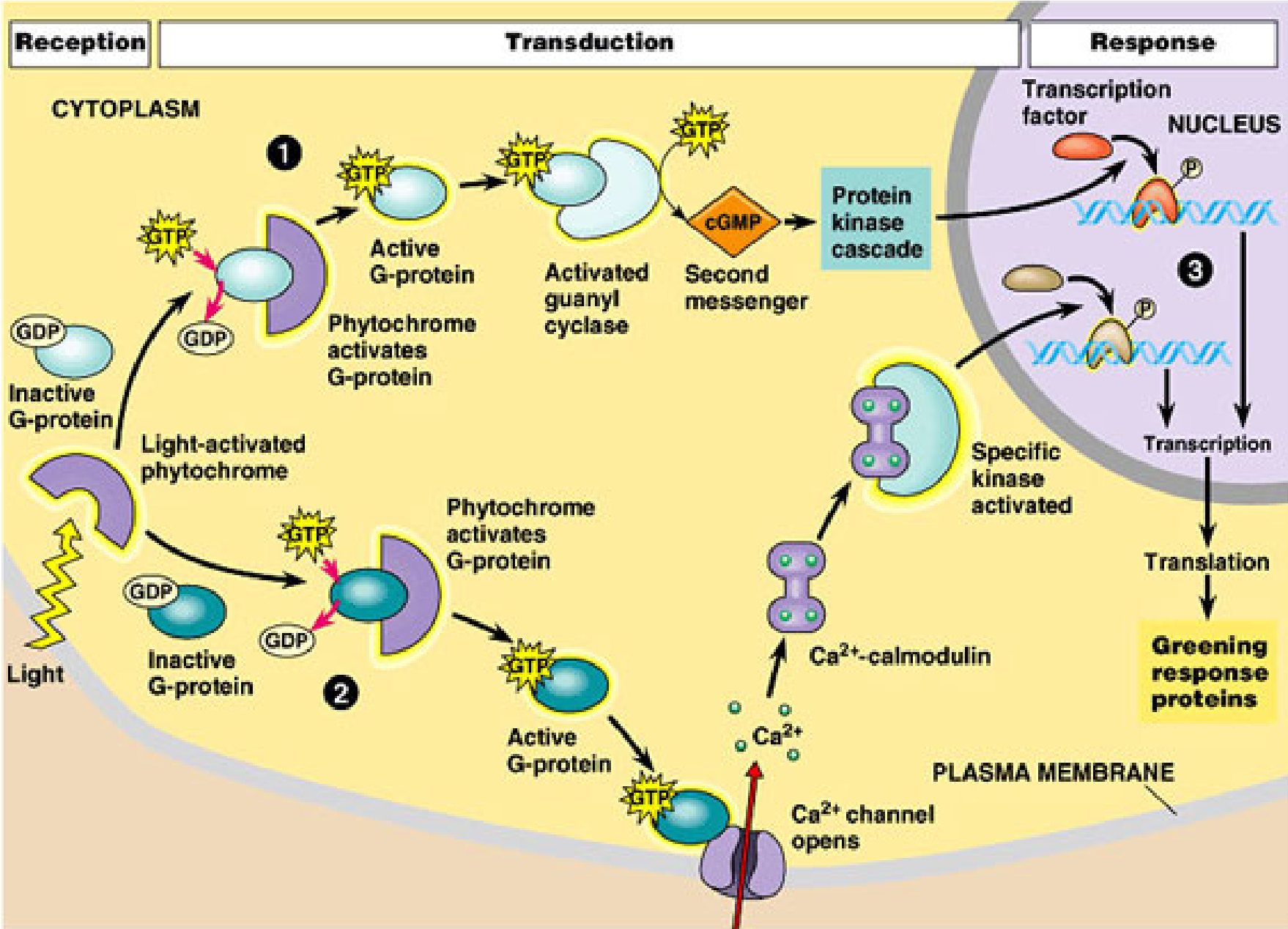
- Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:
 - που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
 - που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
 - που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και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

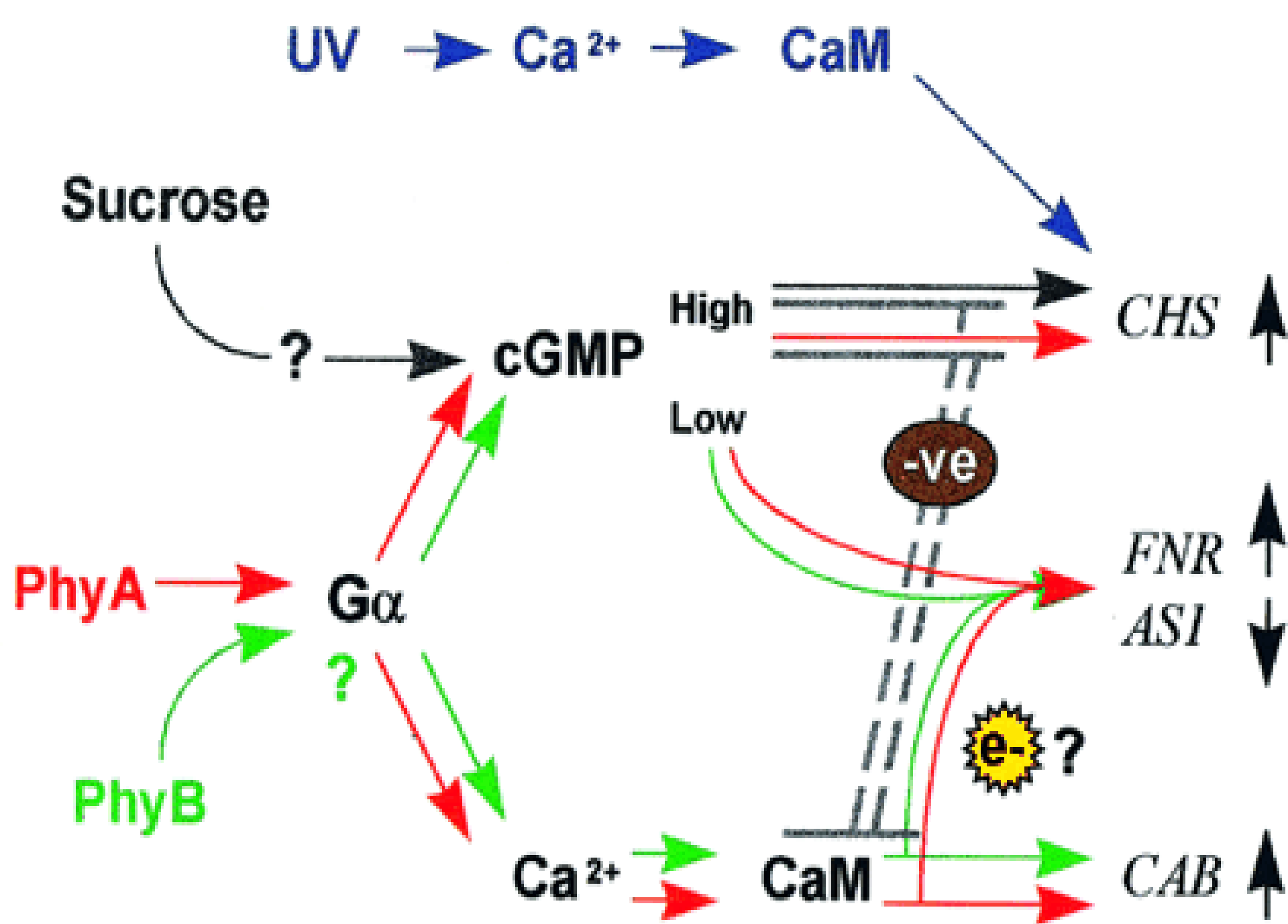
ΦΩΤΟΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ – ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΥΠΟΔΟΧΕΩΝ

Φωτορύθμιση μεταβολικών μονοπατιών

Η φωτορύθμιση ενός μεταβολικού μονοπατιού γίνεται συνήθως είτε με την φωτοελεγχόμενη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση ενζύμων, είτε με την επαγωγή/αναστολή της γονιδιακής έκφρασης κάποιων ενζύμων-κλειδιών του βιοχημικού μονοπατιού. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες για τους πιθανούς φωτούποδοχείς και τις αλυσίδες μεταφοράς σήματος που ελέγχουν το εν λόγω μονοπάτι. Το βιοσυνθετικό μονοπάτι των ανθοκυανινών ίσως αποτελεί το πιο γνωστό, αλλά και το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα φωτορύθμισης μεταβολικού μονοπατιού. Είναι γνωστό ότι σειρά από τα συμμετέχοντα ένζυμα στην βιοσύνθεση των ανθοκυανινών αλλά και των παραγώγων τους ρυθμίζονται από το φως. Οι φωτούποδοχείς, που συμμετέχουν σε αυτή την απόκριση, είναι ένας άγνωστος μέχρι σήμερα UV-B φωτούποδοχέας, ένας κρυπτοχρωματικός και το PhyA. Το PhyA συμμετέχει στην φωτορύθμιση του βιοσυνθετικού μονοπατιού κυρίως στα πρώτα αναπτυξιακά στάδια του φυτού, ενώ με την ανάπτυξη του φυτού ο ρόλος του υποβαθμίζεται. Πρόσφατα αποτελέσματα παρουσιάζουν μια ανεξάρτητη από κάθε φωτούποδοχέα ρύθμιση.

Βιοσύνθεση του φωτοσυνθετικού μηχανισμού





Βιοσύνθεση ανθοκυανινών

PhyA \implies G-πρωτεΐνη \implies cGMP \implies Κινάσες \implies Ανθοκυανίνες

Κρυπτόχρωμα \implies Ca²⁺ \implies Κινάσες \implies Ανθοκυανίνες

Φωτοϋποδοχέας UV-B \implies Ca²⁺ \implies Καλμοδουλίνη \implies Κινάσες
 \Downarrow
Ανθοκυανίνες

Η αλυσίδα μεταφοράς σήματος που ξεκινά από το PhyA, ενεργοποιεί μια ετεροτριμερή G-πρωτεΐνη, που με την σειρά της επάγει την αύξηση του cGMP. Η αλυσίδα μεταφοράς σήματος συνεχίζεται με την ενεργοποίηση κάποιας κινάσης σερίνης/θρεονίνης πριν την επαγωγή της γονιδιακής έκφρασης των φωτορυθμιζόμενων ενζύμων. Εκτός από το PhyA, η βιοσύνθεση των ανθοκυανινών ρυθμίζεται από ένα άγνωστο μέχρι σήμερα UV-B φωτοϋποδοχέα και έναν κρυπτοχρωμικό φωτοϋποδοχέα κυανής ακτινοβολίας. Οι αλυσίδες μεταφοράς σήματος, που ξεκινούν από τους δύο αυτούς φωτοϋποδοχείς, περιλαμβάνουν αύξηση του ενδοκυττάριου Ca²⁺ και ενεργοποίηση κινασών, αλλά σε αντίθεση με την φυτοχρωμικά ελεγχόμενη απόκριση δεν πρόκειται για κινάσες σερίνης/θρεονίνης. Ενώ και οι δύο αλυσίδες, που ξεκινούν με UV-B και κυανή ακτινοβολία, φαίνεται να έχουν κοινά ενδιάμεσα, στην αλυσίδα που ελέγχεται από τον UV-B φωτοϋποδοχέα μετά την αύξηση του Ca²⁺ παρεμβάλλεται η ενεργοποίηση μιας καλμοδουλίνης. Αυτή η διαφοροποίηση επιβεβαιώνει και την διαφορετικότητα των δύο φωτοϋποδοχέων.

Cell wall

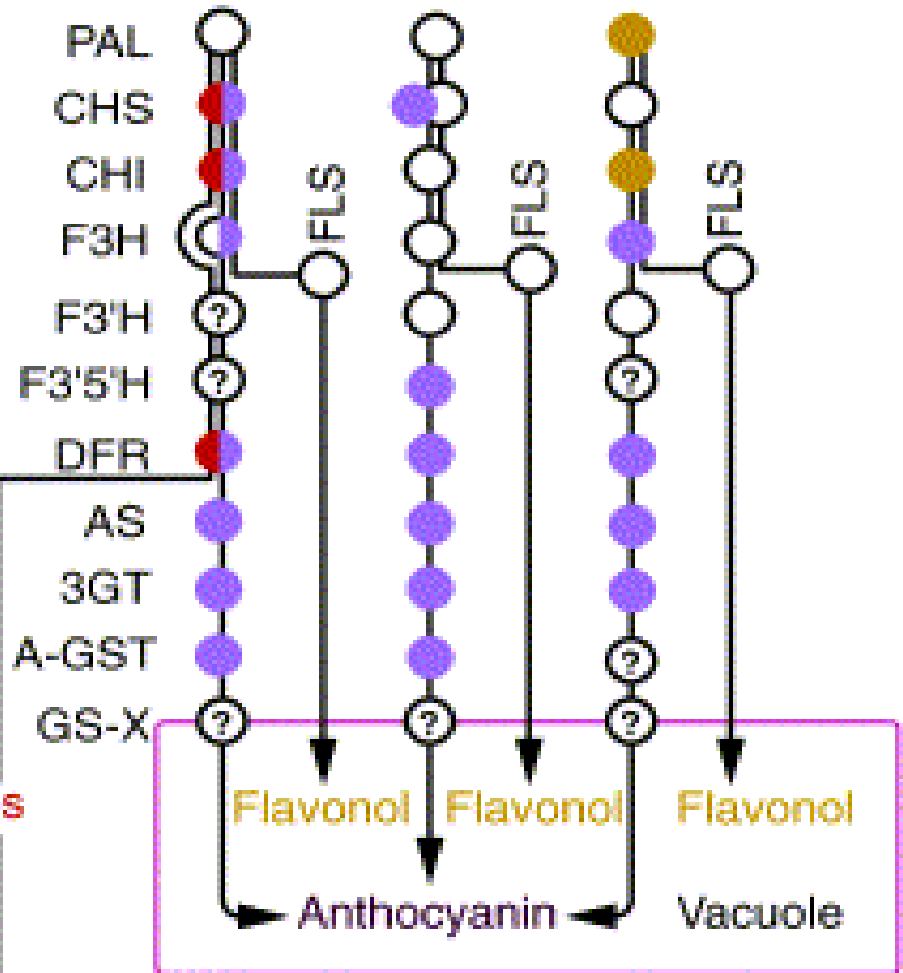
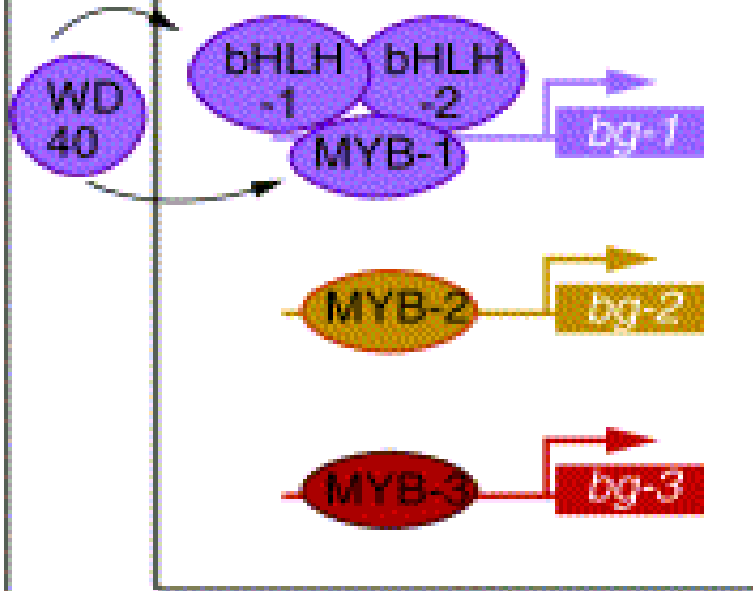
Nucleus

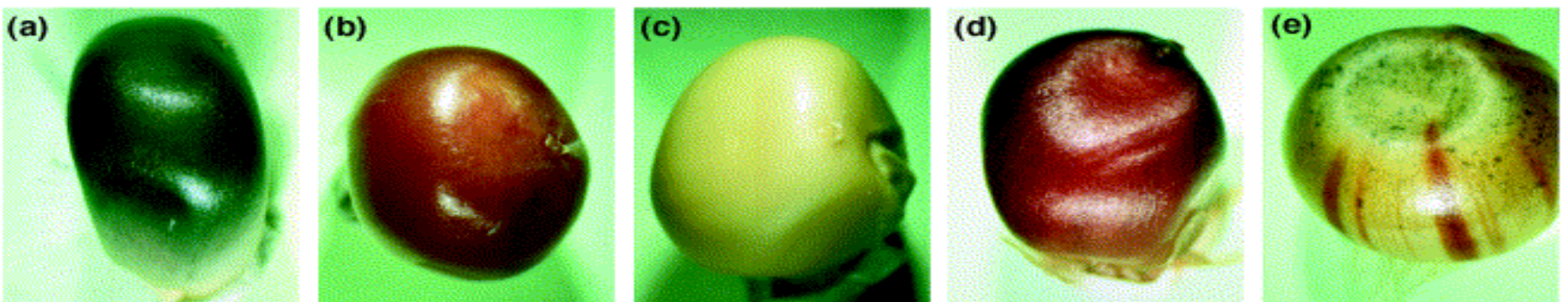
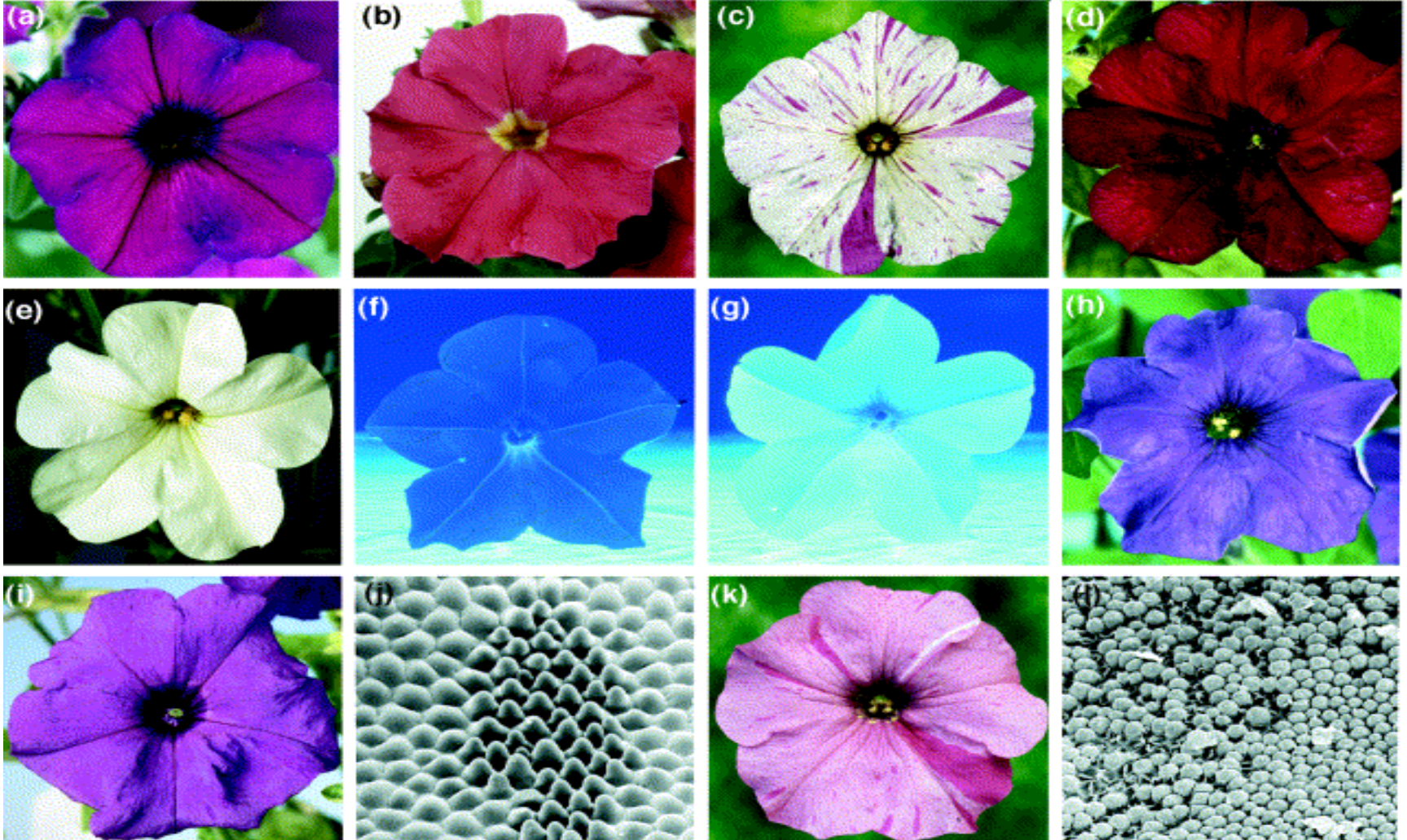
Cytoplasm

Maize

Petunia

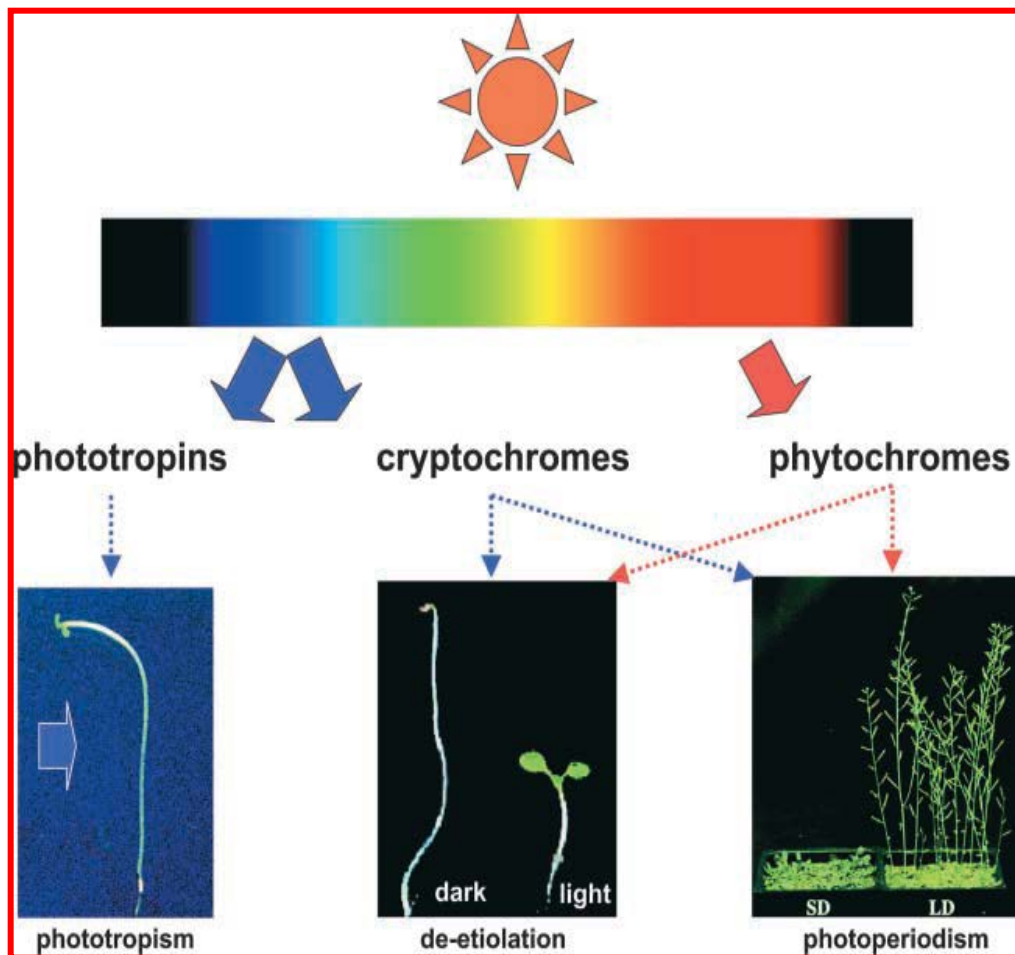
Antirrhinum majus





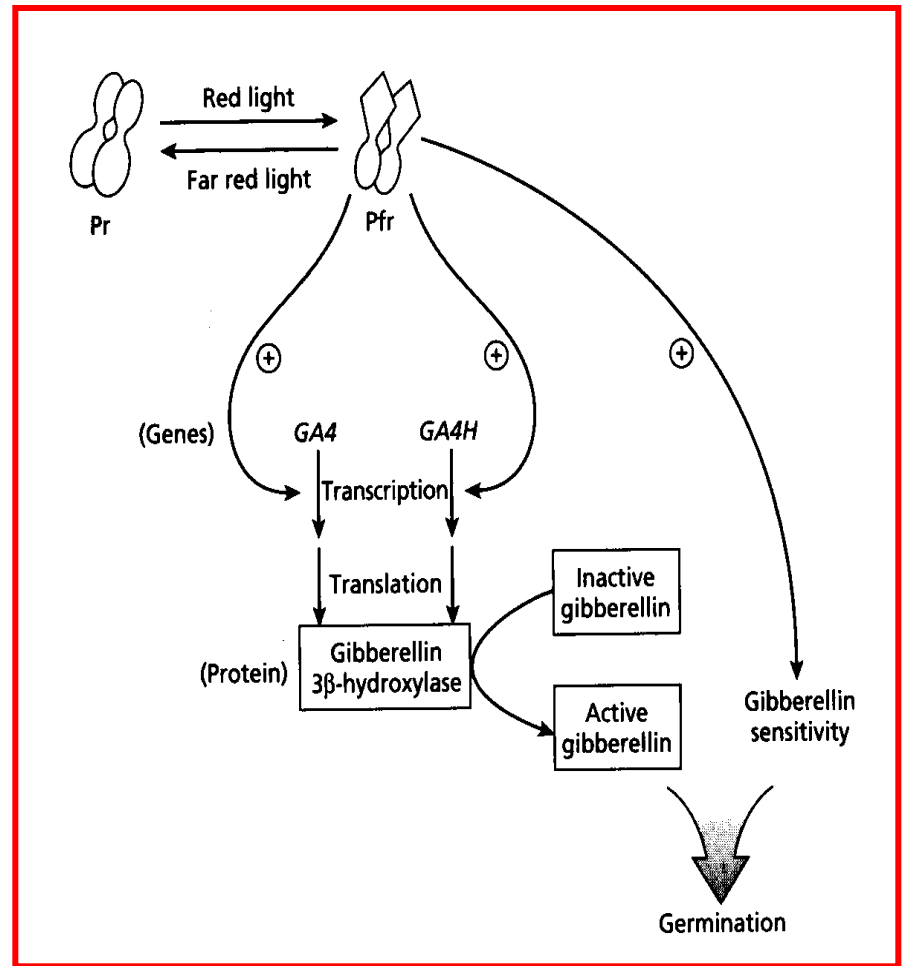
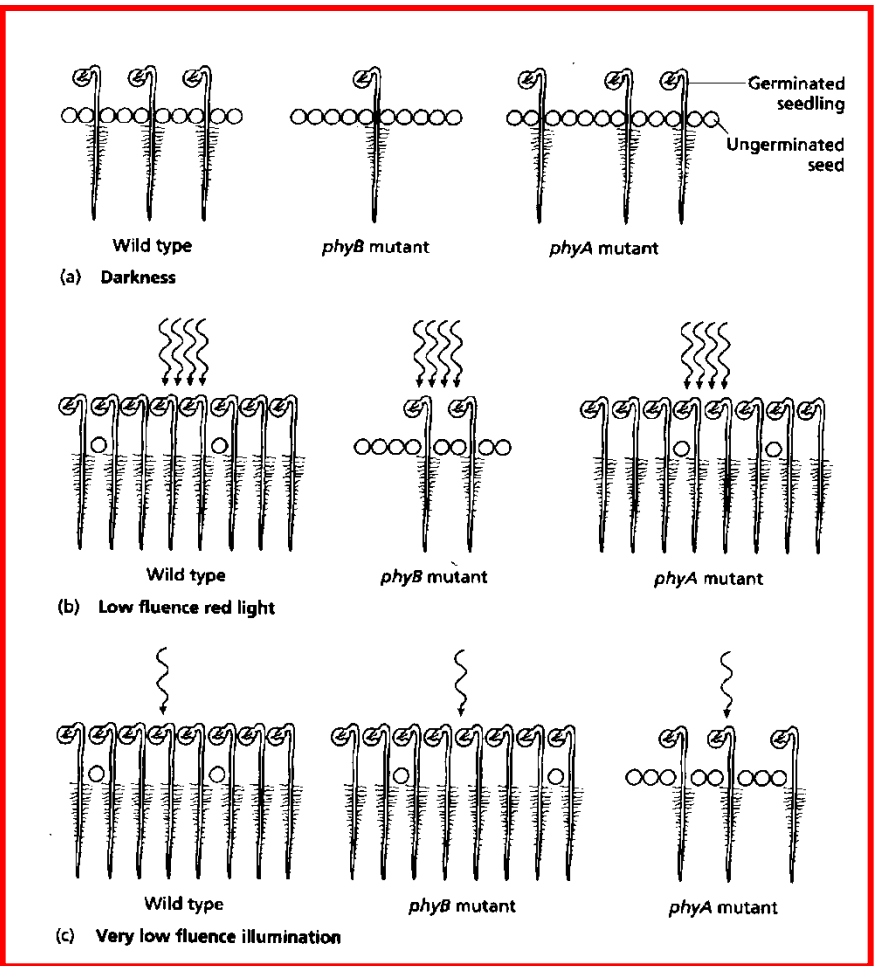
Φωτομορφογενετικές αποκρίσεις

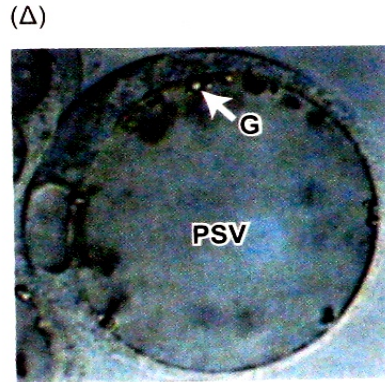
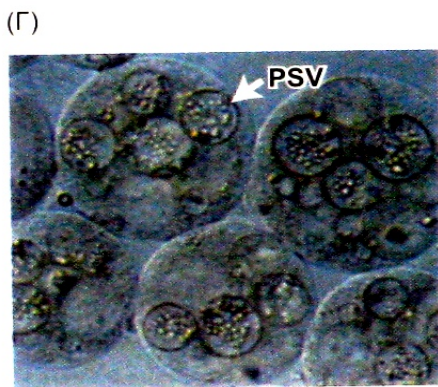
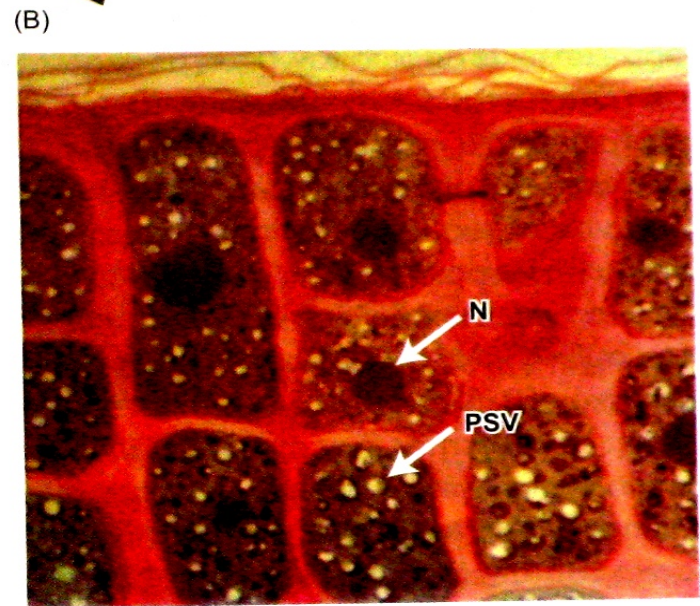
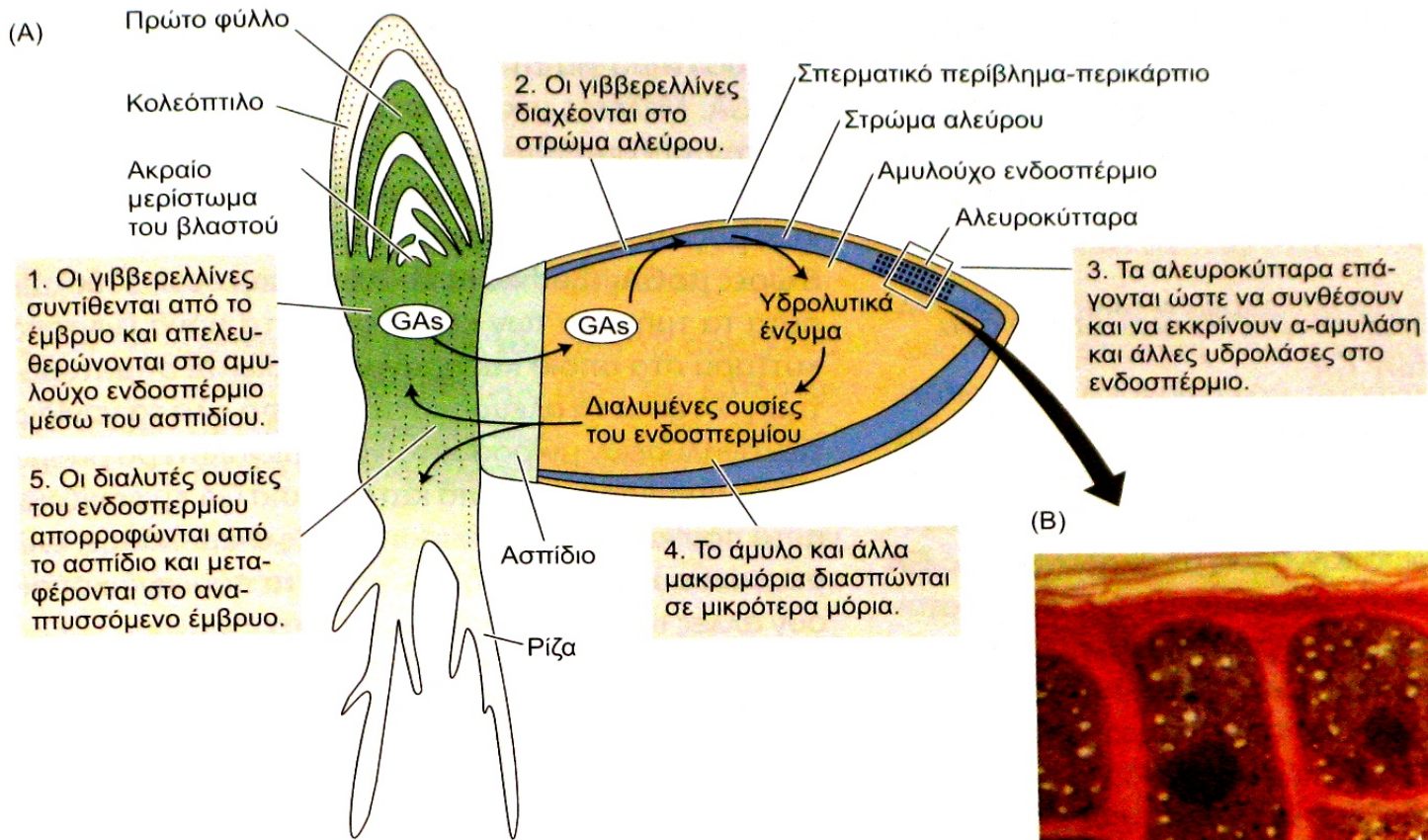
Η ελεγχόμενη από το φως μορφή ενός φυτικού οργανισμού ονομάζεται **φωτομορφογένεση**. Σε όλες τις μορφογενετικές αποκρίσεις, που ελέγχονται από το φως, συνήθως συμμετέχουν και αλληλεπιδρούν περισσότεροι του ενός φωτουποδοχείς. Η αποχλώρωση, το «σύνδρομο αποφυγής σκιάς», η «end of day» απόκριση, η «αναγνώριση γειτόνων», ο φωτοτροπισμός, η βλάστηση και η άνθιση είναι οι κυριότερες φωτομορφογενετικές αποκρίσεις των φυτών.



Βλάστηση

Η επαγωγή της βλάστησης από το φως ρυθμίζεται φυτοχρωματικά. Ανάλογα με τις φωτονιακές συνθήκες αλλάζει και ο πρωτογενής φωτοϋποδοχέας. Σε συνθήκες χαμηλής φωτονιακής ροής, η βλάστηση ελέγχεται ως LFR-απόκριση και όπως όλες οι LFR φυτοχρωματικές αποκρίσεις, έχει ως πρωτογενή φωτοϋποδοχέα το PhyB. Σε συνθήκες πολύ χαμηλής φωτονιακής ροής, η βλάστηση ελέγχεται ως VLFR-απόκριση και πρωτογενής φωτοϋποδοχέας είναι το PhyA.





1. Η GA₁, από το έμβryo εισέρχεται στο αλευροκύτταρο.

2. Αφού εισέλθει στο κύτταρο, η GA₁ προκαλεί την εκκίνηση ενός μονοπατιού που εξαρτάται από ασβέστιο και καλμοδουλίνη, το οποίο είναι αναγκαίο για την έκκριση της α-αμύλασης.

3. Η GA₁ προσδέεται στον GID1 (έναν διαλυτό υποδοχέα GA) στον πυρήνα.

4. Μετά την πρόσδεση της GA₁, ο υποδοχέας GID1 υπόκειται σε αλλοστερική τροποποίηση που διευκολύνει την πρόσδεσή του στην πρωτεΐνη DELLA.

5. Μετά την πρόσδεση της πρωτεΐνης DELLA στο σύμπλοκο GA₁-GID1, μία πρωτεΐνη F-box (μέρος του συμπλόκου SCF) μπορεί τώρα να πολυουβικιτινώσει την επικράτεια GRAS της πρωτεΐνης DELLA.

6. Η πολυουβικιτινωμένη πρωτεΐνη DELLA αποικοδομείται από το 26S πρωτεάσωμα.

7. Μετά την αποικοδόμηση της πρωτεΐνης DELLA, ενεργοποιείται η μεταγραφή ενός πρώιμου γονιδίου. (Σε αυτό το μοντέλο, το *GAMYB* εμφανίζεται ως πρώιμο γονίδιο αν και υπάρχουν στοιχεία πως μπορεί να προηγείται μεταγραφική ρύθμιση άλλων πρώιμων γονιδίων.) Το mRNA του *GAMYB* μεταφράζεται στο κυτταρίδιωμα.

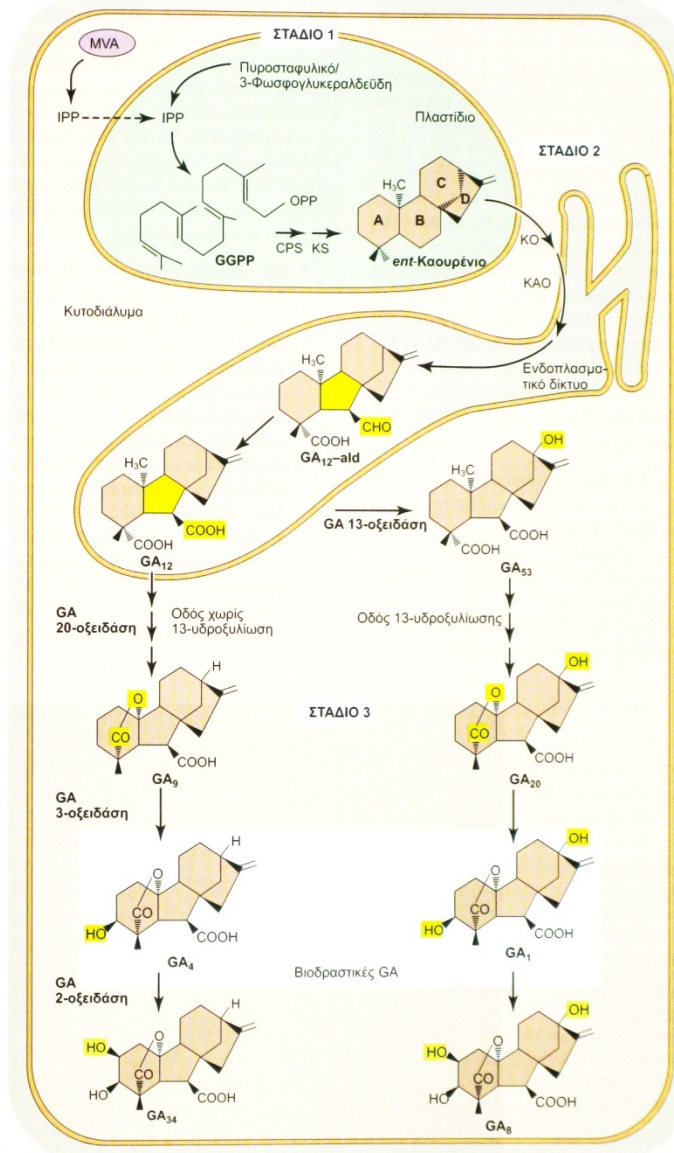
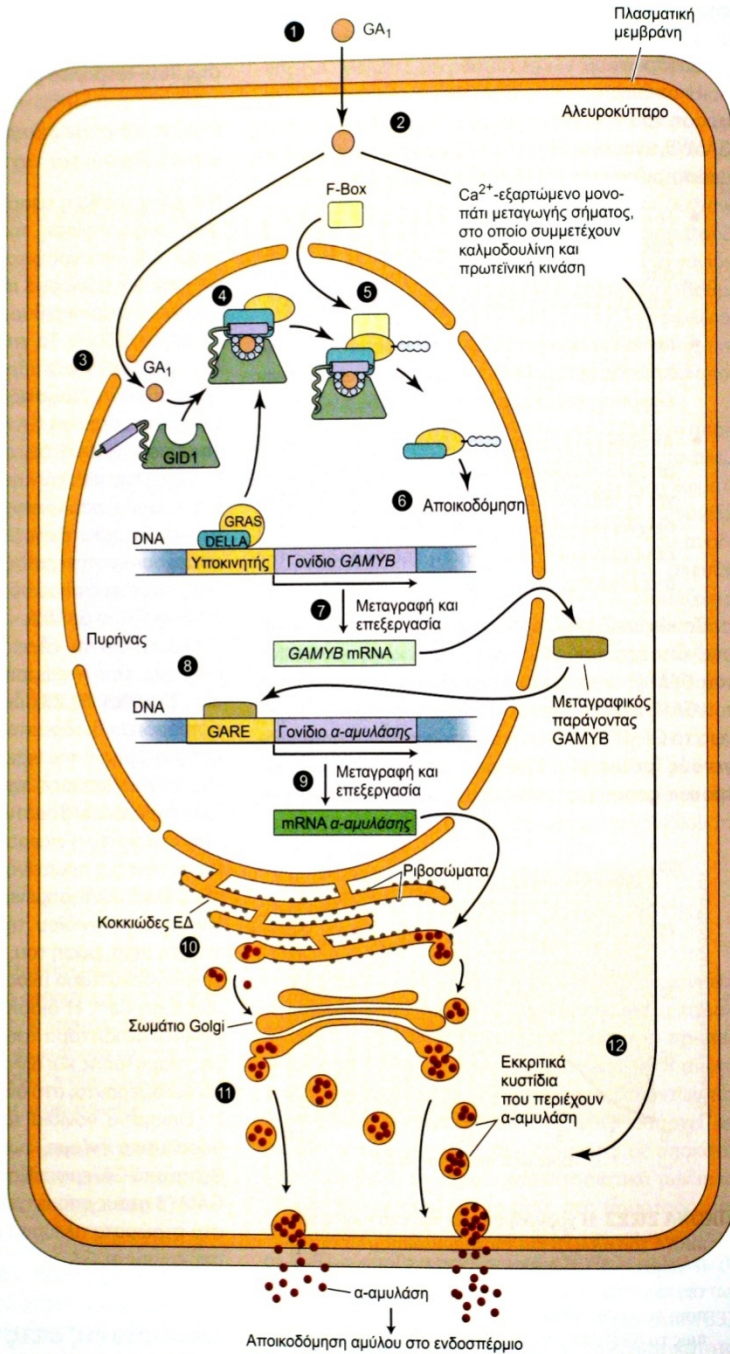
8. Ο νεοσυνθεμένος μεταγραφικός παράγοντας *GAMYB* εισέρχεται στον πυρήνα και προσδέεται στους υποκινητές των γονιδίων της α-αμύλασης καθώς και γονιδίων που κωδικοποιούν άλλα υδρολυτικά ένζυμα.

9. Ενεργοποιείται η μεταγραφή αυτών των γονιδίων.

10. Η α-αμύλαση και άλλες υδρολάσες συντίθενται στο κοκκιώδες ΕΔ, υψίστανται επεξεργασία και πακετάρονται σε εκκριτικά κυστίδια από τη συσκευή Golgi.

11. Οι πρωτεΐνες εκκρίνονται με εξωκύτωση.

12. Το εκκριτικό μονοπάτι απαιτεί τη διέγερση από GA του μονοπατιού που εξαρτάται από ασβέστιο και καλμοδουλίνη.



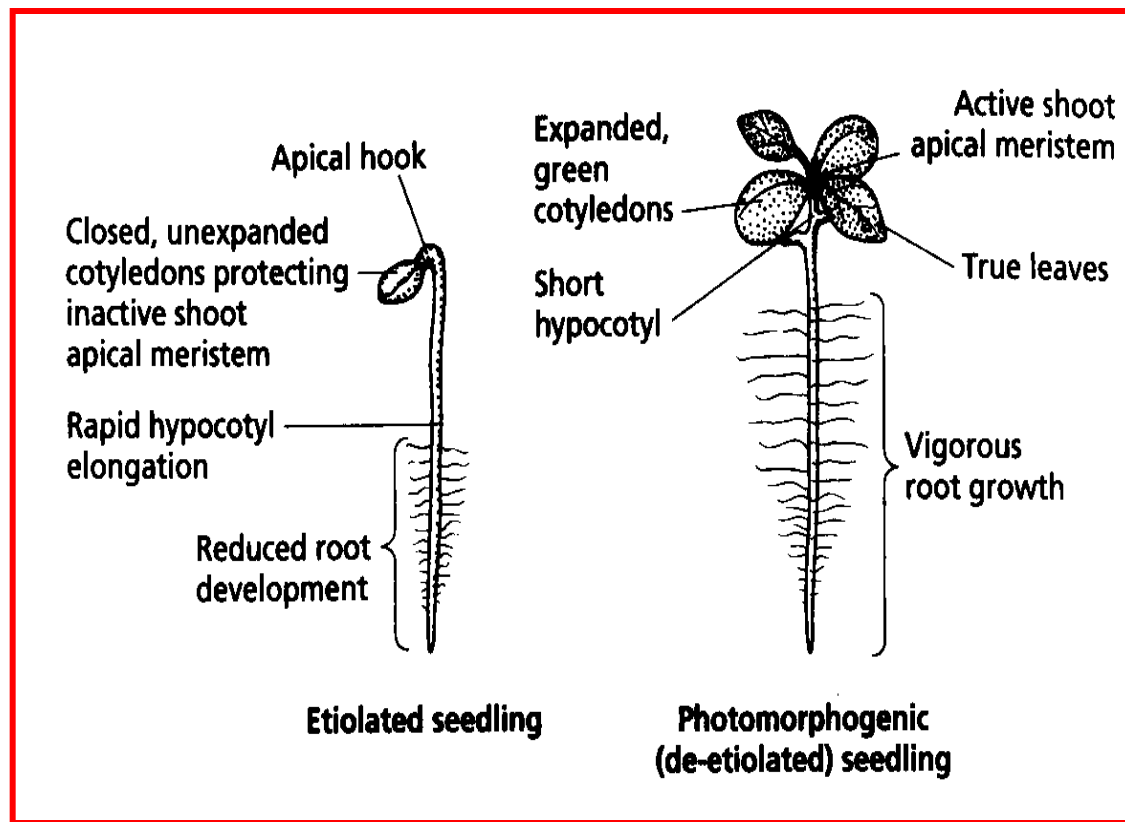
L. Taiz and E. Zeiger (2012). Φυσιολογία Φυτών (1^η ελληνική έκδοση – επιμ. Κ. Θάνας) . Υποτα Εκδόσεις ΕΠΕ. ISBN 978-960-98123-9-9

Αποχλώρωση

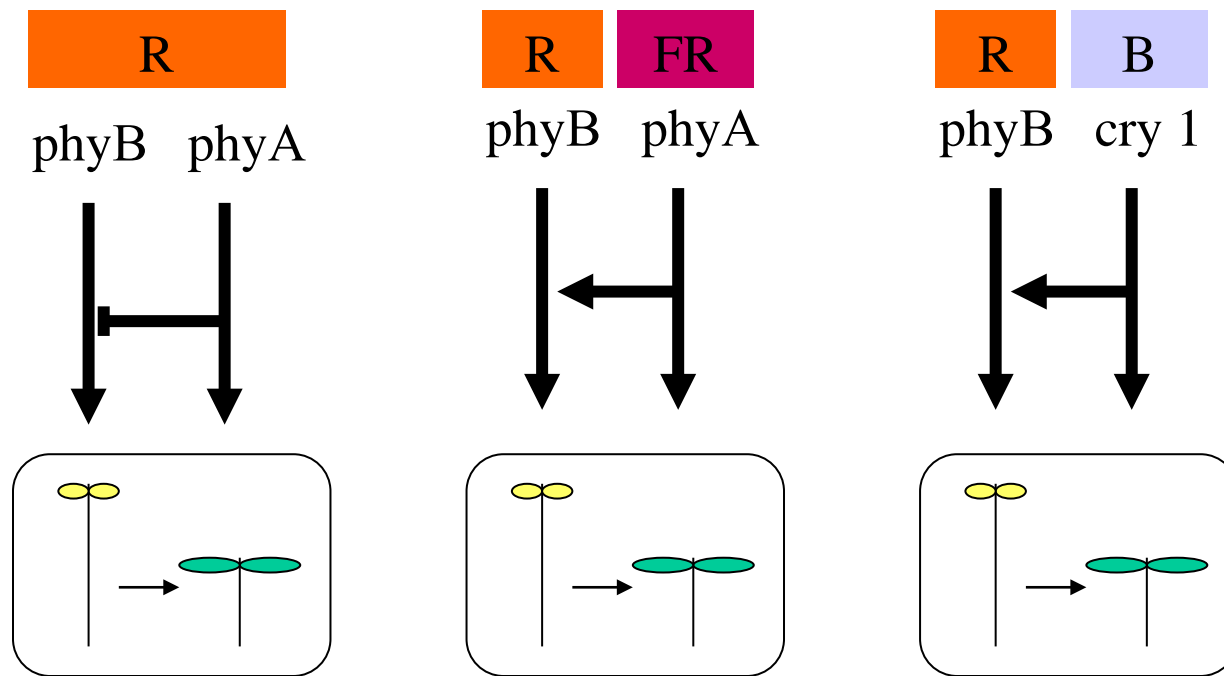
Με την έκθεση των φυτών, που αναπτύχθηκαν σε απόλυτο σκοτάδι, στο φως, παρατηρούνται οι παρακάτω φωτοελεγχόμενες μορφογενετικές αλλαγές:

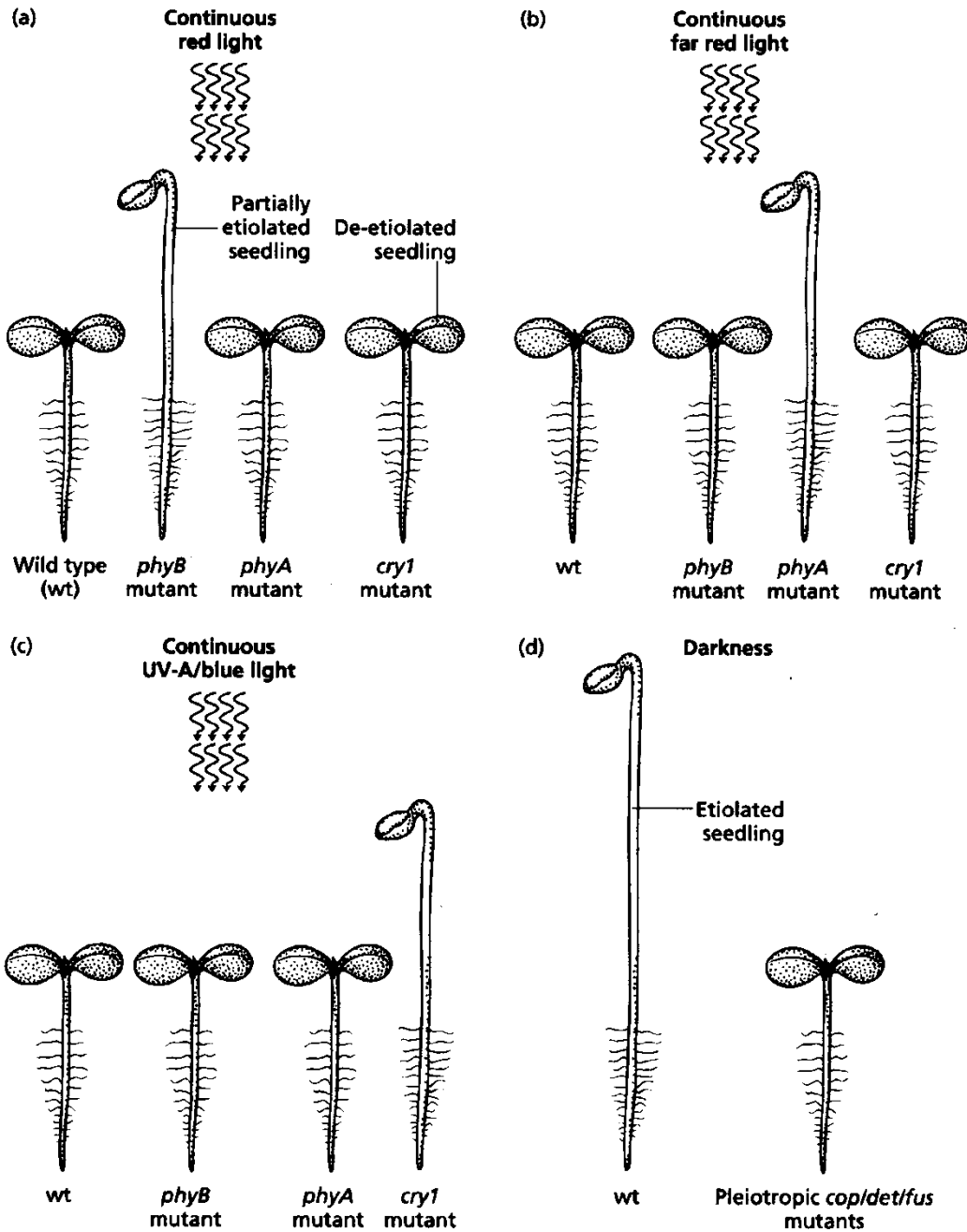
- Μείωση της αύξησης του υποκοτυλίου.
- Άνοιγμα του ακραίου αγκίστρου. Και
- Φωτοανάπτυξη του φωτοσυνθετικού μηχανισμού και του χλωροπλάστη.

Πρόσφατα πειράματα με σπορόφυτα *Arabidopsis*, που αναπτύχθηκαν στο σκοτάδι και εκτέθηκαν σε διαφορετικής ποιότητας φωτισμό, έδειξαν μια διαφορετική αλληλεπίδραση φωτούποδοχέων στη ρύθμιση αυτής της απόκρισης.

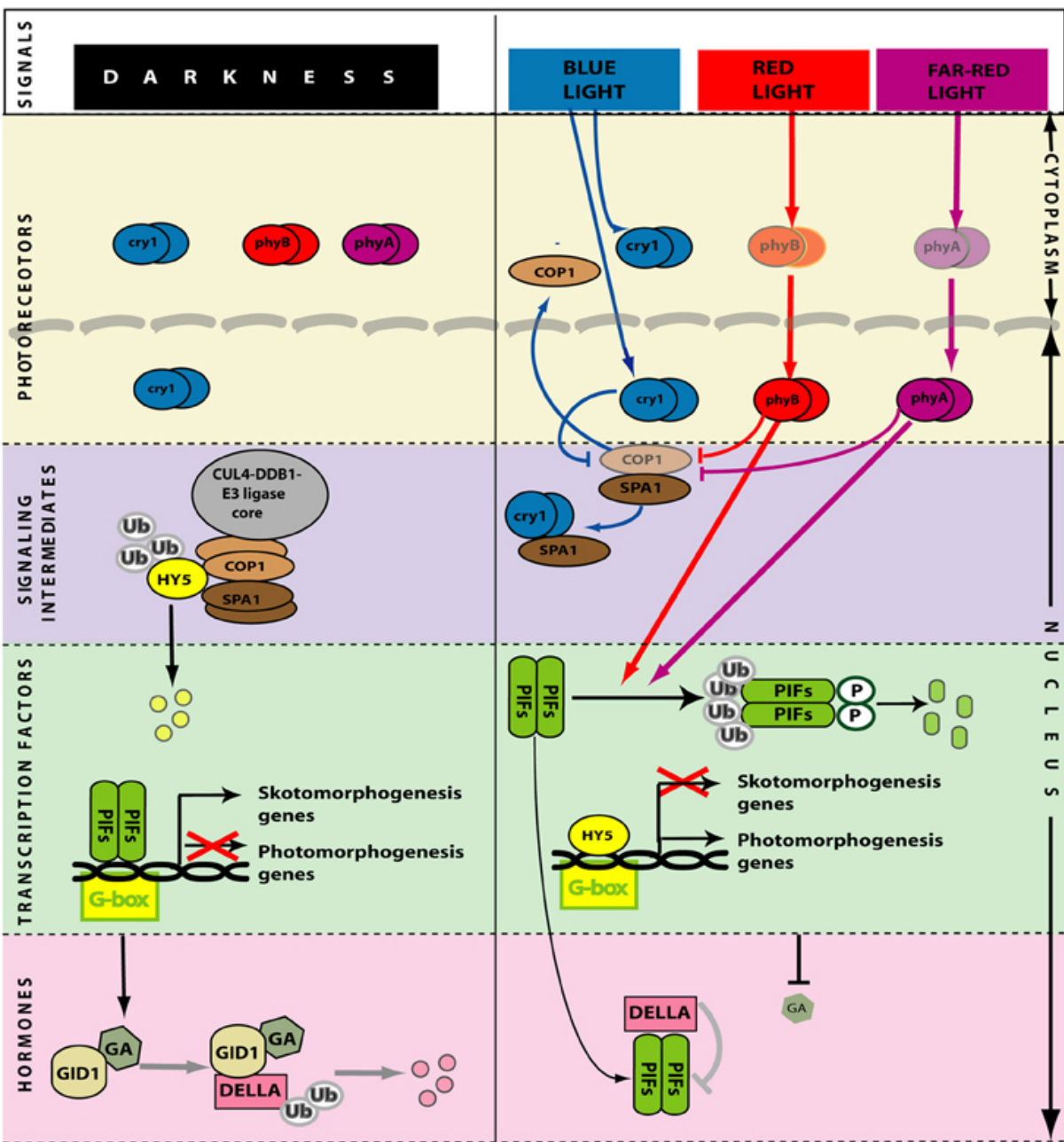


Φυτάρια που αναπτύσσονται στο απόλυτο σκοτάδι που διακόπτεται μόνο από ένα παλμό ερυθράς ακτινοβολίας, η διαδικασία της αποχλώρωσης ρυθμίζεται θετικά από το ενεργό PhyB επί του οποίου επιδρά αρνητικά το PhyA, με αποτέλεσμα σε μεταλλαγμένα φυτάρια, όπου λείπει το PhyA το επίπεδο της αποχλώρωσης να είναι εντονότερο. Εάν του ερυθρού παλμού προηγηθεί συνεχής FR-ακτινοβολία τότε για την αποχλώρωση αλληλεπιδρούν πάλι PhyB και PhyA, με την μόνη διαφορά, ότι σε αυτήν την περίπτωση το PhyA ενισχύει την απόκριση του PhyB. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, εάν προηγηθεί του ερυθρού παλμού κυανή ακτινοβολία (αντί της FR-ακτινοβολίας), γίνεται εμφανές ότι ο κρυπτοχρωμικός φωτύποδοχέας CRY1 ενισχύει την απόκριση του PhyB. Όλα αυτά δείχνουν ότι η φωτορύθμιση μιας μορφογενετικής διαδικασίας, όπως αυτή της αποχλώρωσης, δεν είναι δεδομένη αλλά εξαρτάται και από τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες.





Απλοποιημένο μοντέλο της φωτονειακής αντίληψης και σηματοδότησης κατά την απογλήρωση

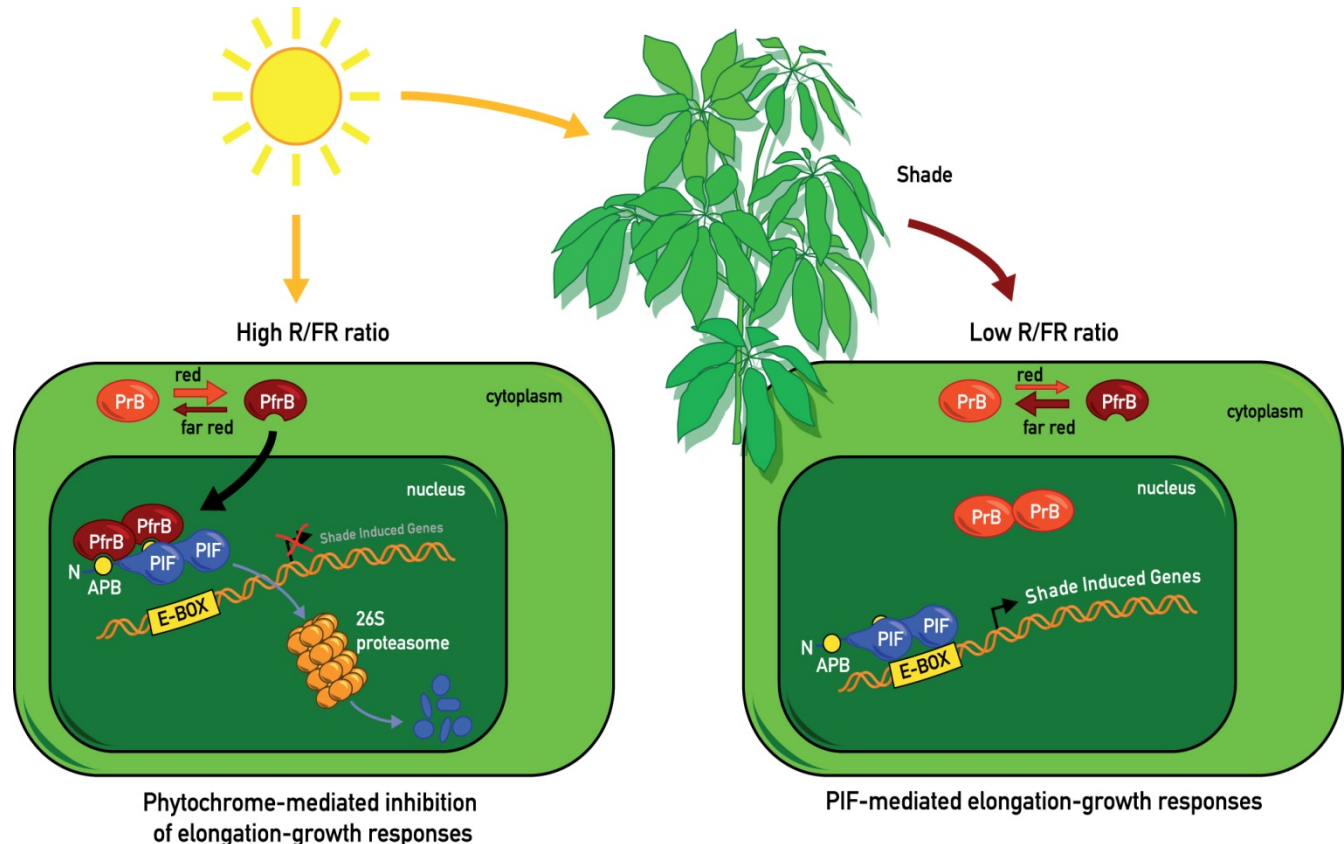


Στο σκοτάδι (αριστερά) οι φωτοϋποδοχείς είναι ανενεργοί. Οι PIF μεταγραφικοί παράγοντες επάγουν σκοτομορφογενετικές αποκρίσεις. Ο HY5 και άλλοι μεταγραφικοί παράγοντες που επάγουν φωτομορφογένεση είναι ουβικιτινωμένες από τη λιγάση CUL4-DDB1-COP1-SPA1 E3 και αποδομούνται από το 26S πρωτεάσωμα. Τα υψηλά επίπεδα των γιβερελλινών προκαλούν υποβάθμιση του DELLA.

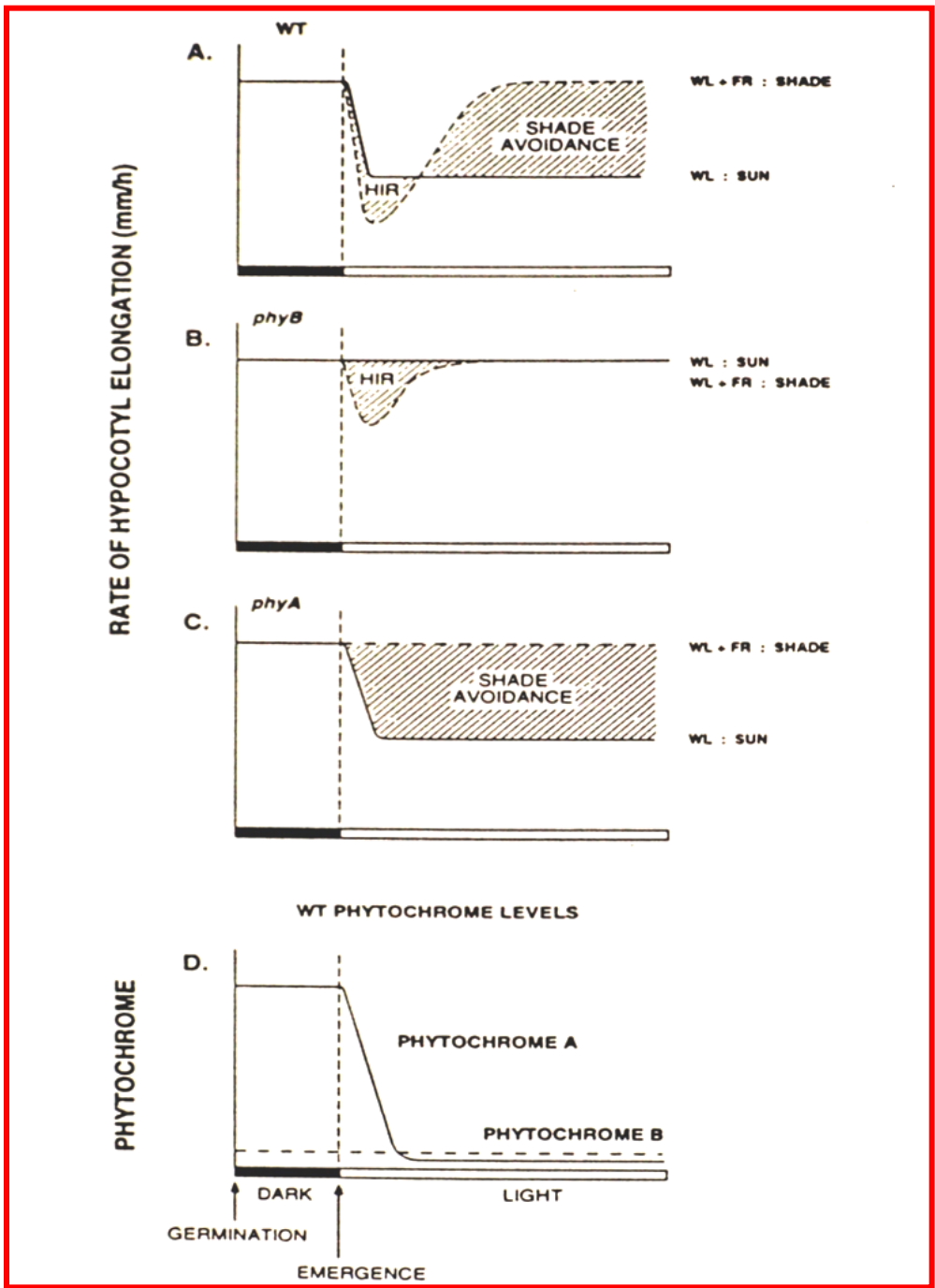
Στο φως (δεξιά) ενεργοποιούνται οι φωτοϋποδοχείς. Στον πυρήνα, φυτοχρώματα (που μεταναστεύουν από το κυτταρόπλασμα στην ενεργή μορφή τους) και κρυπτοχρώματα αλληλεπιδρούν με τον COP1, μειώνουν τη δραστηριότητα του και επιτρέπουν την αύξηση του HY5. Στον πυρήνα, τα φυτοχρώματα μειώνουν τη δράση του PIFs. Τα επίπεδα γιβερελίνης μειώνονται και οι DELLA συσσωρεύονται και δεσμεύουν PIFs μειώνοντας περαιτέρω τη δραστηριότητά τους.

Το σύνδρομο της αποφυγής σκιασμού

Πρόκειται για την επαγωγή της αύξησης του βλαστού σκιοφυτών για να αποφύγουν τον σκιασμό. Αναφέρθηκε ήδη παραπάνω ότι το ηλιακό φάσμα, που διαπερνά την φυλλωσιά υπερκείμενων φυτών για να φτάσει σε ένα σκιοφύτο παρουσιάζει μείωση της σχέσης ζ (R-/FR-ακτινοβολία), λόγω απορρόφησης της ερυθράς ακτινοβολίας από τις χλωροφύλλες των υπερκειμένων στοιβάδων φύλλων. Η μείωση του παράγοντα ζ=R/FR επιδρά μέσω του PhyB. Σύμφωνα με πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα, υπάρχουν ενδείξεις ότι και οι φωτοϋποδοχείς PhyD και PhyE συμμετέχουν στην αύξηση του βλαστού για την αποφυγή της σκιάς.

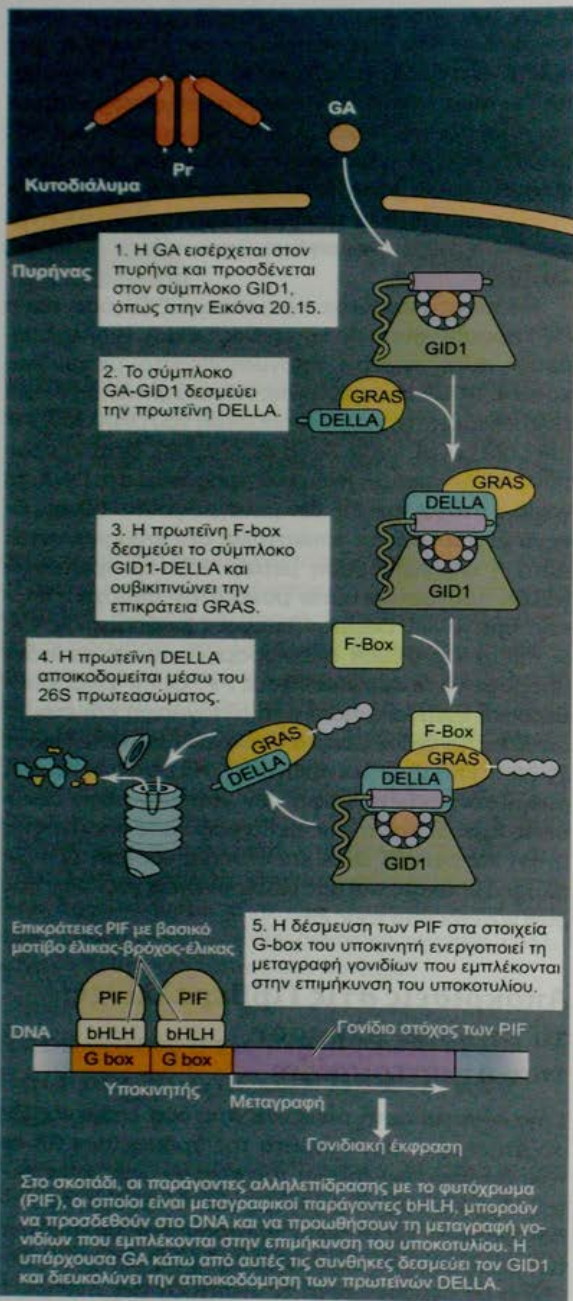


Διαχωρισμός της αύξησης του υποκοτυλίου κατά την αποχλώρωση και την απόκριση για την αποφυγή σκιασμού. Η πειραματική διαδικασία που παρατείθεται υποδεικνύει το PhyB ως κεντρικό φωτοϋποδοχέα για τον έλεγχο της αποκρίσης που αφορά την αποφυγή σκιάς, ενώ το PhyA ως κύριο φωτοϋποδοχέα (στις συγκεκριμένες συνθήκες) στην αποχλώρωση.

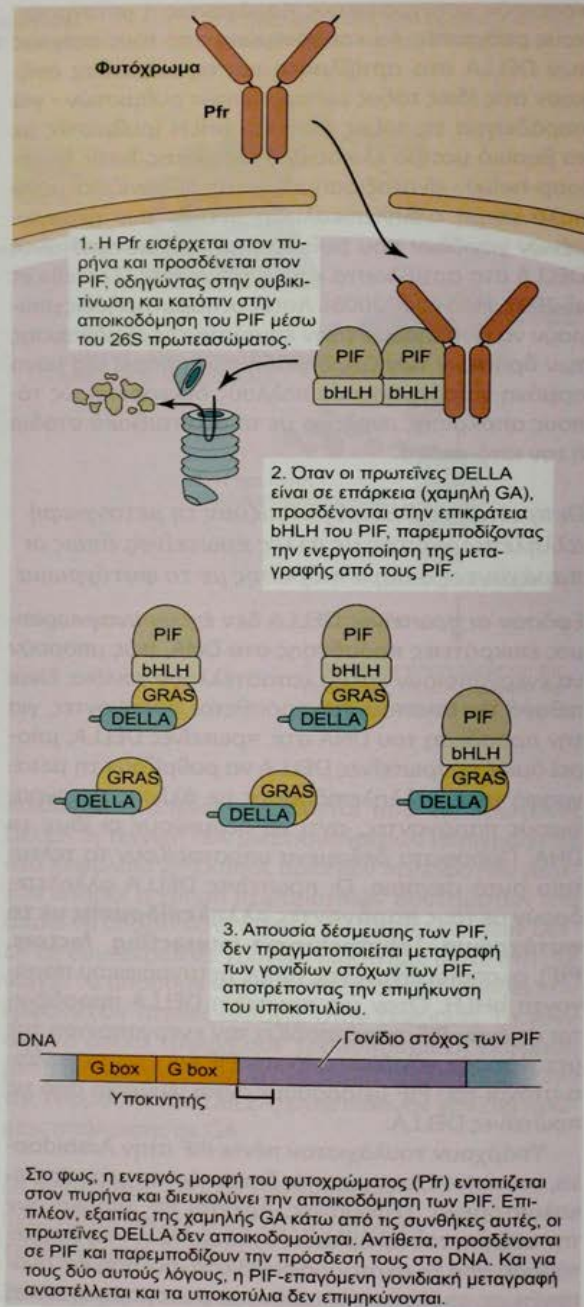


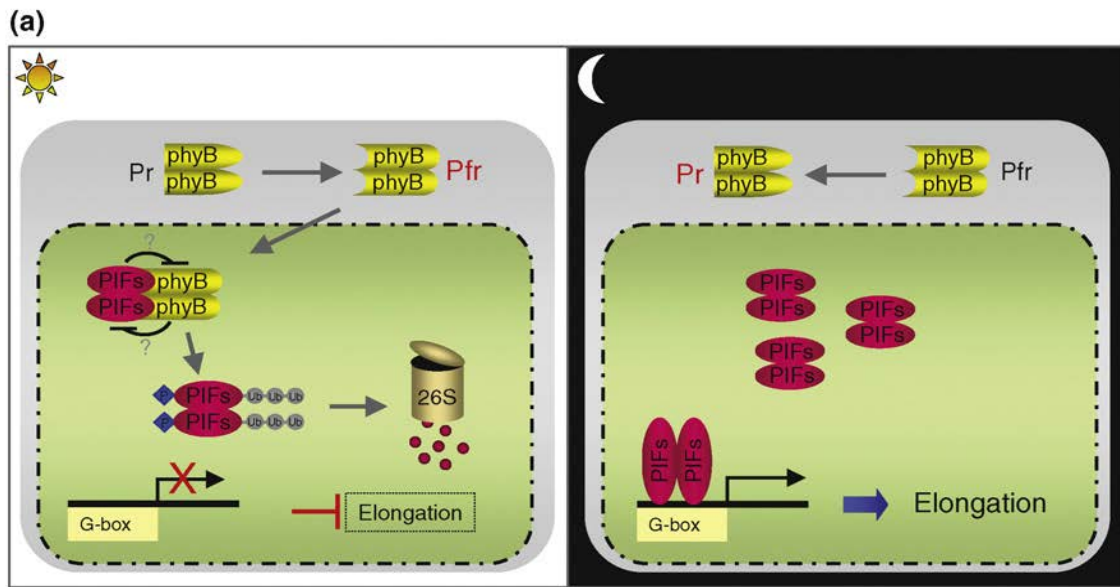
Συνέργεια φυτοχρωματικών φωτοϋποδοχέων και ορμονών (GA) στον έλεγχο του ρυθμού αύξησης του υποκοτυλίου

(Α) Σκοτάδι / υψηλή GA → μακρύ υποκοτύλιο

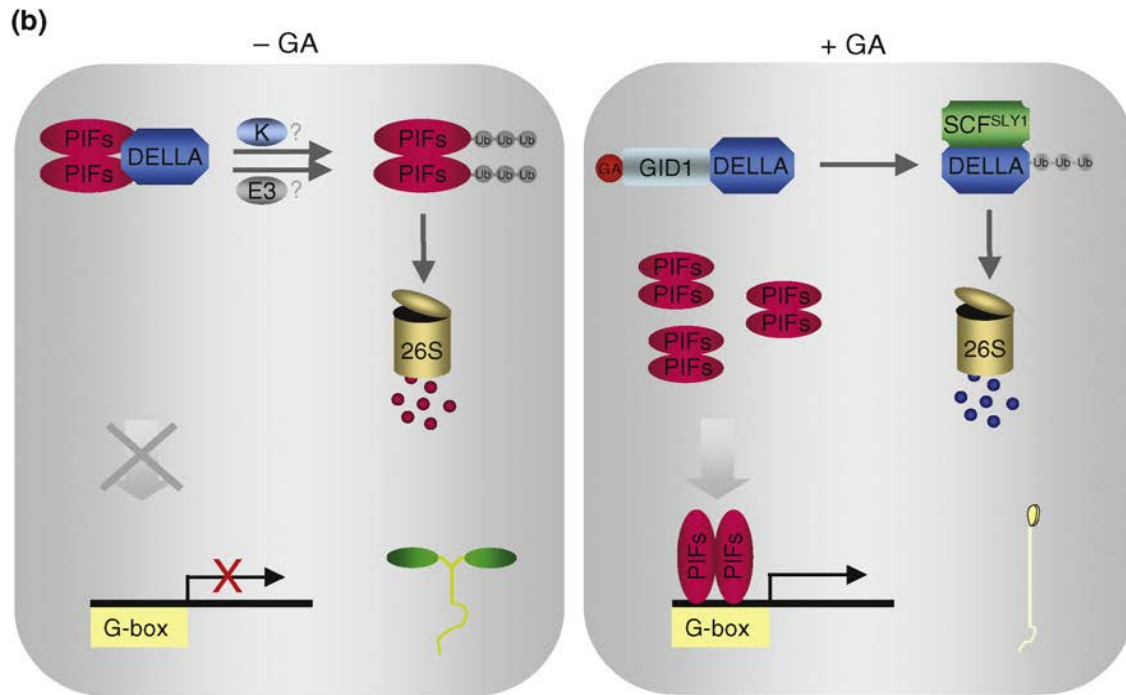


(Β) Φως / χαμηλή GA → βραχύ υποκοτύλιο



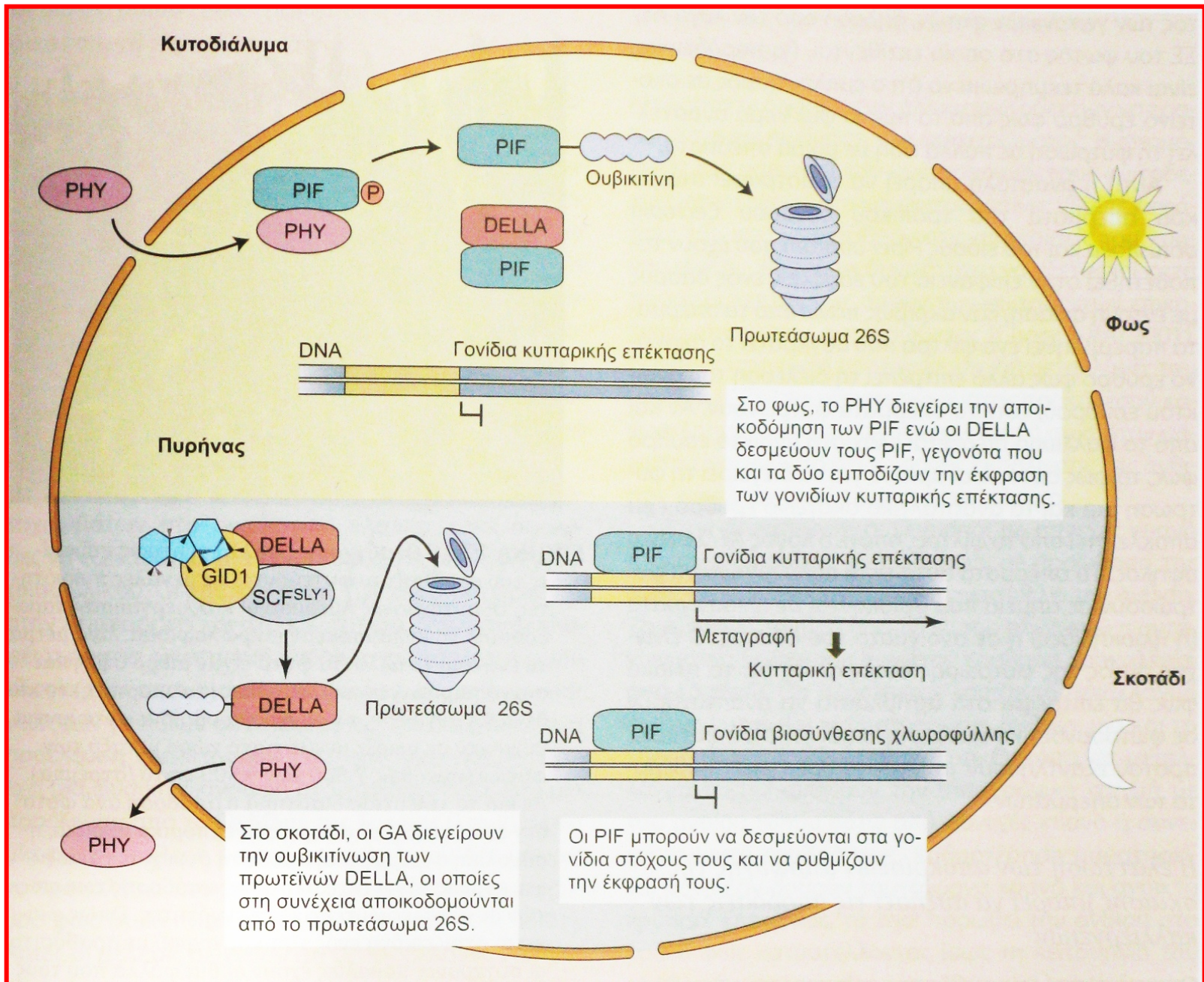


(α) Οι φωτοεξαρτώμενη αποικοδόμηση των PIFs μέσω του πρωτεασώματος. Σε συνθήκες φωτός, ενεργοποιείται το phyB, μετατοπίζεται στον πυρήνα και συνδέεται με τα PIFs. Τα PIFs φωσφορυλιώνονται (P) με ένα εξαρτώμενο από το phyB τρόπο και ουβικιτινώνονται (Ub) από μία άγνωστη E3 λιγάση πριν την αποικοδόμηση τους από το πρωτεάσωμα. Στο σκοτάδι, ωστόσο, αυξημένη συγκέντρωση των PIFs επάγει την μεταγραφή γονιδίων-στόχων, με αποτέλεσμα την κυτταρική επιμήκυνση.



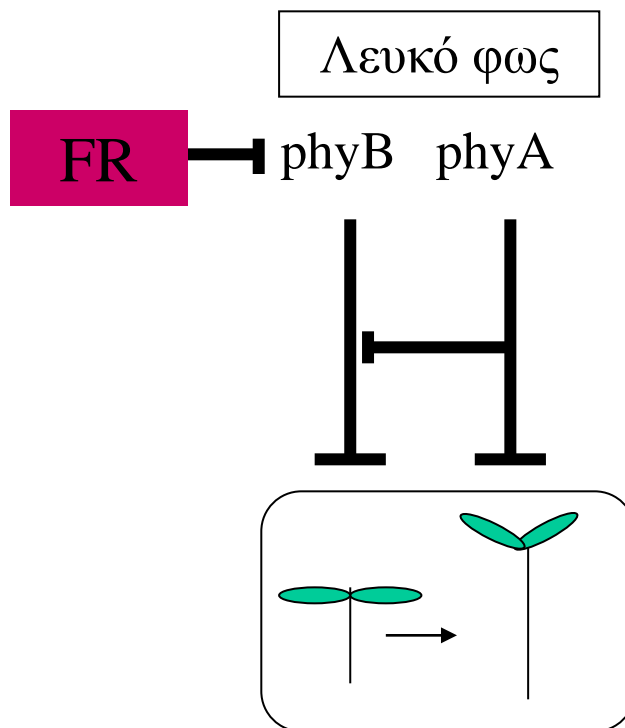
(β) Ρύθμιση των PIFs πρωτεϊνών κατά την ελεγχόμενη από την γιββερελλίνη (GA) σηματοδότηση. Απουσία GA, οι πρωτεΐνες DELLA αλληλεπιδρούν άμεσα με τις PIFs (PIF3 και PIF4) και αναστέλλουν την μεταγραφική τους δραστηριότητα. Μετά την έκθεση στο φως, οι PIFs είναι φωσφορυλιώνονται (P) από μια, ακόμη αγνώστων στοιχείων, κινάση (K), ουμπικιτινώνονται (Ub) από άγνωστη λιγάση E3 και τελικά αποδομούνται από το 26S πρωτεάσωμα. Παρουσία GA, η GID1 συνδέεται με την GA και οδηγεί τις DELLA πρωτεΐνες σε υποβάθμιση από το σύμπλοκο SCFSLY1 / GID2. Ελεύθερες πρωτεΐνες PIFs συνδέονται με τα στοιχεία G-box για να ενεργοποιήσει τη μεταγραφή των γονιδίων επιμήκυνσης.

Current Opinion in Plant Biology



“End of day” απόκριση (EOD-απόκριση)

Φυτά, που αναπτύσσονται σε ένα φωτονιακό περιβάλλον με υψηλή σχέση R/FR, ένας παλμός FR-ακτινοβολίας στο τέλος της ημέρας επάγει την αύξηση του βλαστού. Αυτή η απόκριση ονομάζεται EOD-απόκριση και βρέθηκε ότι αυτή η απόκριση δεν ρυθμίζεται μόνο από το PhyB, που ενεργοποιείται από την έστω προσωρινή μείωση της σχέσης R/FR και αυξάνει τον ρυθμό αύξησης του βλαστού, αλλά και το PhyA επιδρά επί του PhyB και μειώνει την αναστολή της αύξησης του βλαστού. Μεταλλάγματα *PhyA* (απουσία *PhyA*) παρουσιάζουν μια πιο έντονη EOD-απόκριση. Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά την όλη διαδικασία, φαίνεται ότι η αλληλεπίδραση του PhyB με το PhyA στην EOD-απόκριση, είναι ίδια με αυτήν της αποχλώρωσης.



Η «αναγνώριση γειτόνων»

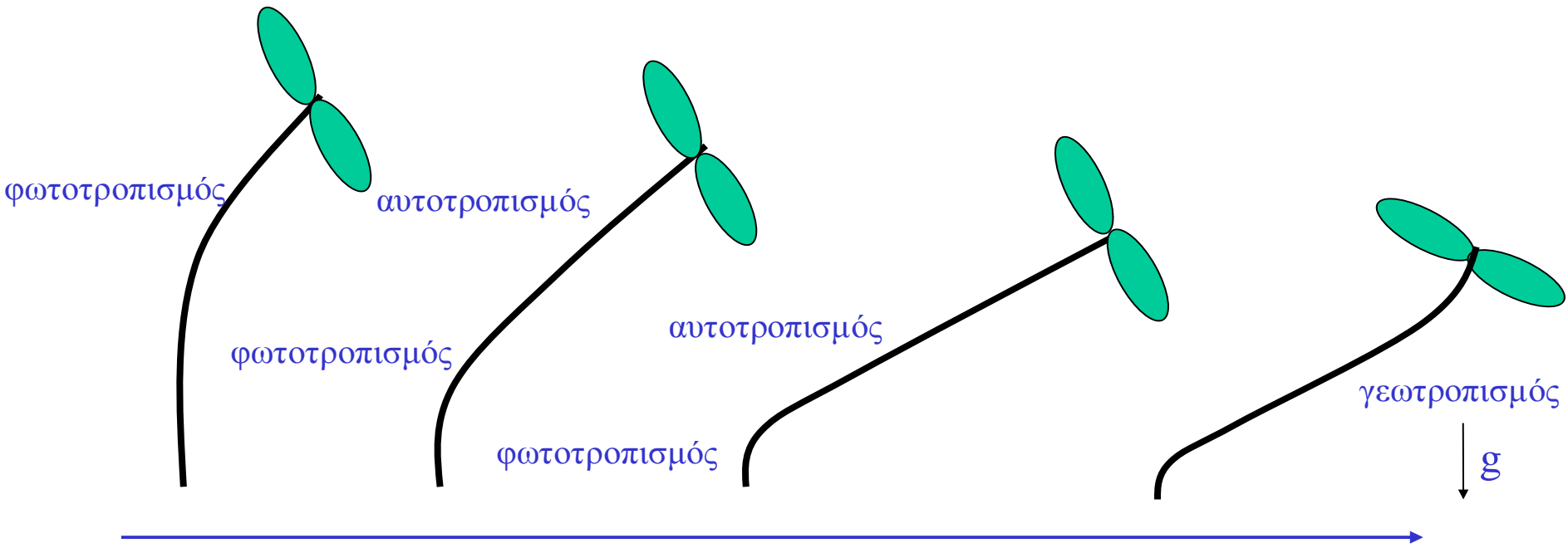
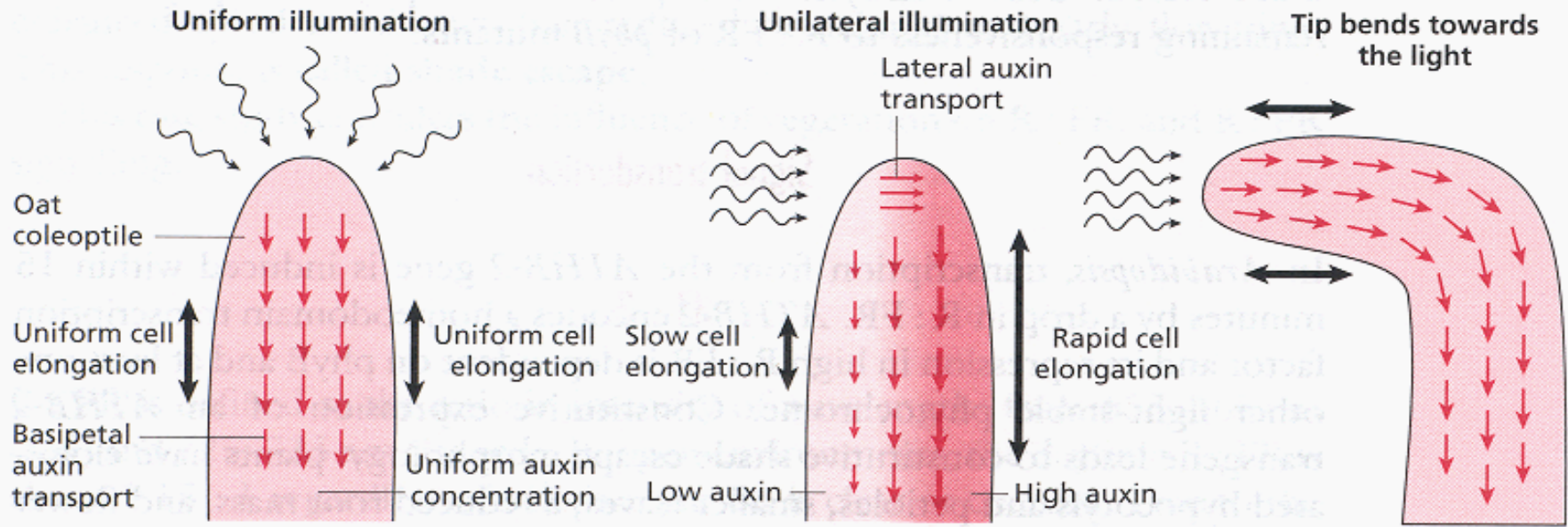
Μια άλλη απόκριση αποφυγής της σκιάς είναι η «αναγνώριση γειτόνων». Τα φυτά έχουν τη δυνατότητα, μέσω συστήματος φωτοϋποδοχέων να αναγνωρίζουν τους γειτόνους (φυτά που βρίσκονται δίπλα τους) και να κρατούν «αποστάσεις ασφαλείας» για τον περιορισμό του αλληλοσκιασμού. Η οριζόντια μείωση της σχέσης R/FR σε φυτά που αναπτύσσονται δίπλα σε άλλα, λόγω της απορρόφησης της ερυθράς ακτινοβολίας από τα γειτονικά φυτά, αλλά και η οριζόντια κλίση της έντασης της κυανής ακτινοβολίας, καθορίζουν την αλλαγή κατεύθυνσης της ανάπτυξης του φυτού απομακρύνοντας το από τα γειτονικά φυτά και μειώνοντας έτσι την πιθανότητα σκιασμού από αυτά. Πειράματα με εξειδικευμένα μεταλλάγματα (*PhyA*, *PhyB*, *CRY1*) έδειξαν ότι στην εν λόγω απόκριση η μείωση του παράγοντα ζ καταγράφεται κυρίως από το *PhyB*, ενώ η ένταση της απόκρισης ρυθμίζεται τόσο από το *PhyA* όσο και από τον κρυπτοχρωμικό φωτοϋποδοχέα *CRY1*.

Φωτοτροπισμός

Φωτοτροπισμός είναι η τροποποίηση της κατεύθυνσης της αύξησης διάφορων οργάνων και ιδιαίτερα του βλαστού, ως απόκριση της διαφορετικής ποσότητας ή/και ποιότητας φωτισμού στις διάφορες πλευρές του οργάνου. Η άνιση ένταση φωτισμού και ιδιαίτερα κυανής ακτινοβολίας στις δύο πλευρές του φυτού, βάσει της Cholodny-Went-θεωρίας, προκαλεί την άνιση κατανομή αυξίνης στις δύο πλευρές ενός οργάνου με αποτέλεσμα την άνιση αύξηση των δύο πλευρών του βλαστού και ως εκ τούτου την κύρτωση του προς την εντονότερη ακτινοβολία. Η κύρτωση αυτή στην πορεία του χρόνου περνά από τρία διαφορετικά στάδια :

- Το στάδιο του φωτοτροπισμού, που αφορά την κυρίως κύρτωση του βλαστού.
- Το στάδιο του αυτοτροπισμού, όπου η αύξηση του βλαστού συνεχίζεται στην κατεύθυνση που καθόρισε το στάδιο του φωτοτροπισμού αλλά με ίση αύξηση των δύο πλευρών του βλαστού.
- Το στάδιο της επίδρασης του γεωτροπισμού, όπου ο βλαστός παρουσιάζει μία δεύτερη κύρτωση προς τα επάνω (αρνητικός γεωτροπισμός).

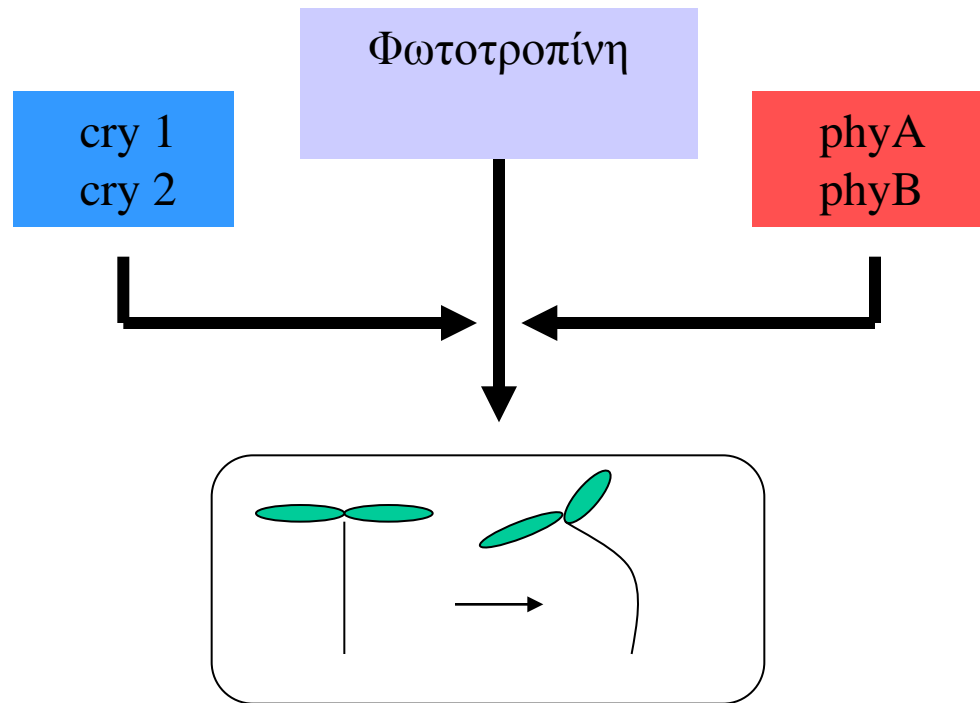
Πειράματα με σπορόφυτα *Arabidopsis thaliana* έδειξαν ότι η φωτοτροπική απόκριση επάγεται από κυανή ακτινοβολία ίση ή μεγαλύτερη από $0,01 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ και η απόκριση αυξάνει μέχρι τα $0,5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$. Περαιτέρω αύξηση της φωτονιακής ροής κυανής ακτινοβολίας μειώνει την απόκριση, που εξαφανίζεται γύρω στα $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$. Μια δεύτερη αύξηση της κυρτότητας παρατηρείται σε υψηλές φωτονιακές ροές αλλά αυτή η απόκριση εξαρτάται άμεσα από την διάρκεια της έκθεσης. Η φωτοτροπική απόκριση σε χαμηλή φωτονιακή ροή ονομάζεται «**πρώτη θετική κύρτωση**», ενώ η απόκριση υψηλής φωτονιακής ροής ονομάζεται «**δεύτερη θετική κύρτωση**».



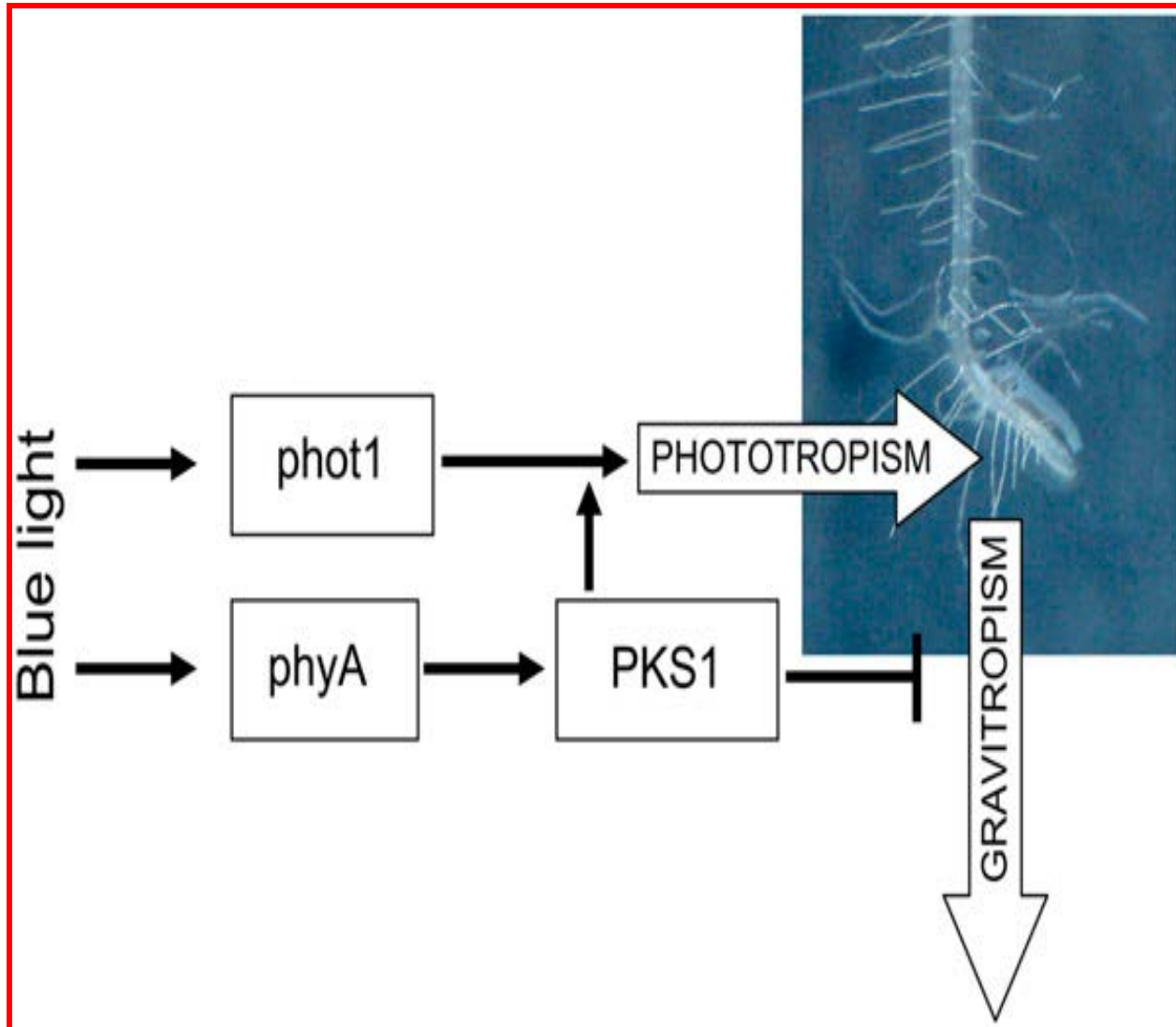
Χρόνος επώασης σε κλίση φωτισμού

Σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα ο πρωτογενής φωτοϋποδοχέας κυανής ακτινοβολίας (φωτοτροπίνη) ενεργοποιεί κάποια κανάλια Ca^{2+} και το Ca^{2+} με την σειρά του ενεργοποιεί εξαρτώμενες από το Ca^{2+} κινάσες (CDPKs), οι οποίες φωσφορυλιώνουν και ως εκ τούτου ενεργοποιούν ένα σύμπλοκο μεταφοράς αυξίνης.

Παρότι η φωτορύθμιση του φωτοτροπισμού γίνεται πρωτίστως από τον φωτοϋποδοχέα φωτοτροπίνη, συμμετέχουν το PhyA και το PhyB, αλλά και οι κρυπτοχρωμικοί φωτοϋποδοχείς CRY1 και CRY2 στην θετική ρύθμιση της έντασης της φωτοτροπικής απόκρισης. Η αλληλεπίδραση τόσων φωτοϋποδοχέων επιτρέπει μια άριστη διαβάθμιση της απόκρισης στα φυτά και τα δίδει τη δυνατότητα προσαρμογής τους σε οποιεσδήποτε αλλαγές του φωτονιακού περιβάλλοντος.

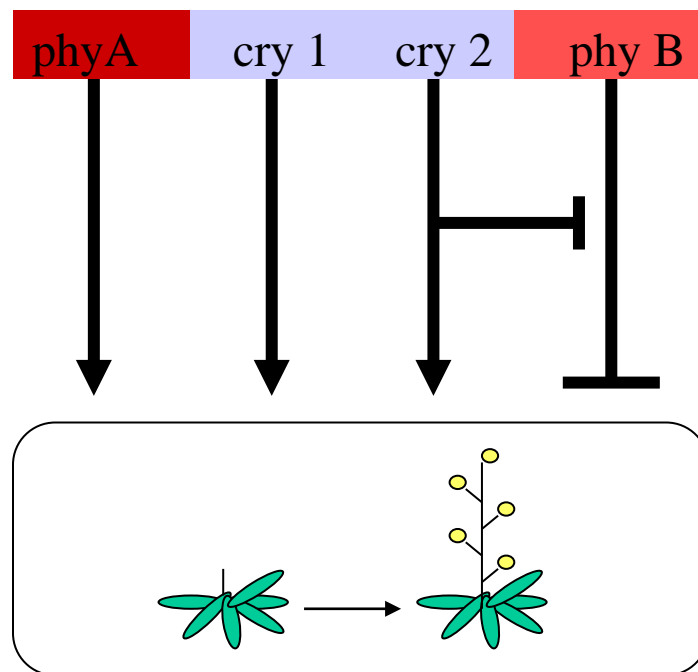


Το μονοπάτι μεταφοράς σήματος του φωτοτροπισμού, όπου συμμετέχει Ca^{2+} και αυξίνη παρουσιάζει ομοιότητες με την αλυσίδα μεταφοράς σήματος του γεωτροπισμού. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται καθαρά μηχανισμός επίδρασης / ρύθμισης φωτοτροπισμού και γεωτροπισμού ρίζας, μέσω κυανής ακτινοβολίας



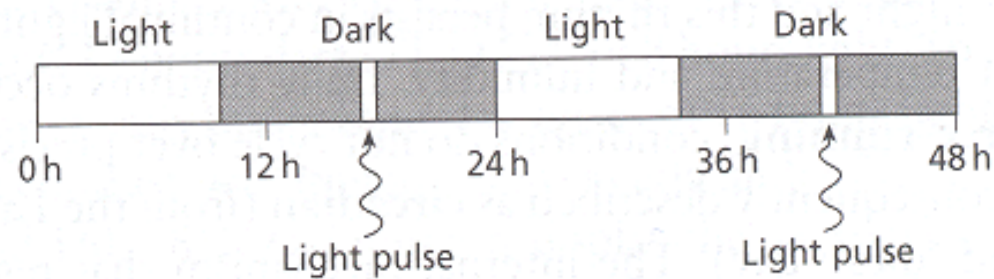
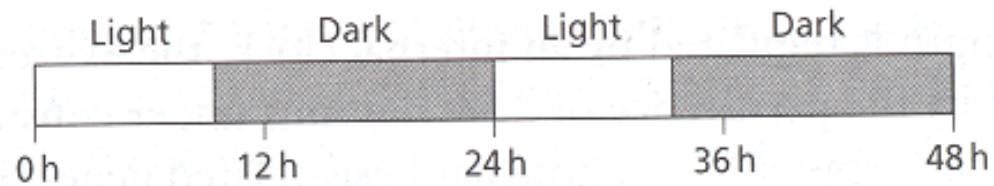
Άνθιση

Είναι γνωστό ότι τα φυτά έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν την εναλλαγή ημέρας–νύκτας και με την συνδρομή και άλλων περιβαλλοντικών αλλαγών, όπως της θερμοκρασίας να επάγουν την άνθιση. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες φυτών όσον αφορά την διάρκεια της φωτοπεριόδου που επάγει την άνθιση. Φυτά στα οποία επάγεται η άνθιση με μικρές φωτοπεριόδους ονομάζονται **μικρής ημέρας φυτά**, ενώ φυτά στα οποία επάγεται η άνθιση με μεγάλες φωτοπεριόδους ονομάζονται **μεγάλης ημέρας φυτά**. Σειρά πειραμάτων που αφορούν την φωτονιακή ρύθμιση της άνθισης φυτών και των δύο κατηγοριών μπορούν να συνοψισθούν σε ένα μοντέλο όπου η άνθιση ελέγχεται θετικά από το PhyA, αλλά και από τους κρυπτοχρωμικούς φωτουποδοχείς CRY1 και CRY2. Το PhyB αναστέλλει γενικά την άνθιση, ενώ την αρνητική αυτή απόκριση του PhyB την περιορίζει ο φωτουποδοχέας CRY2.

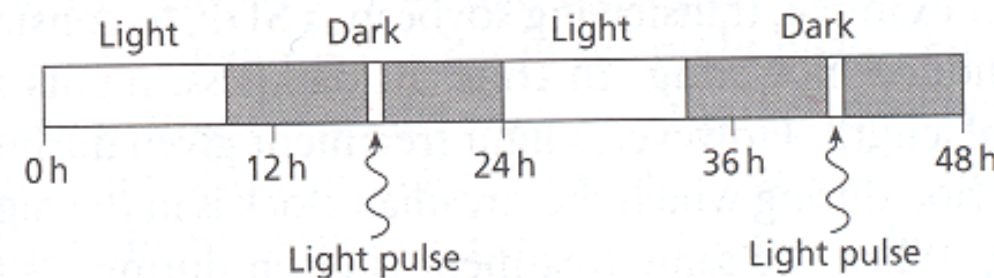
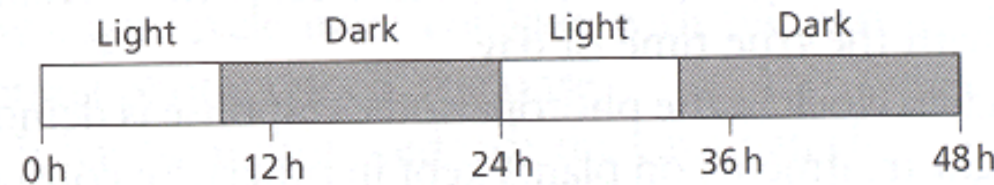


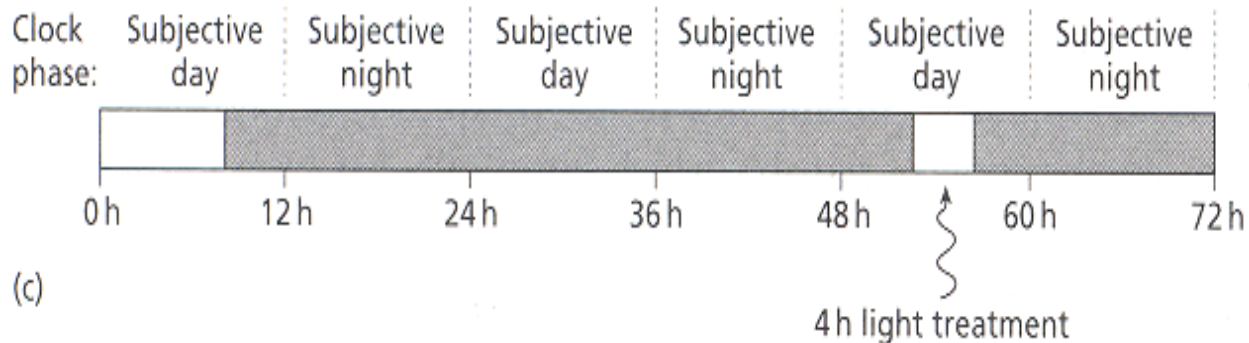
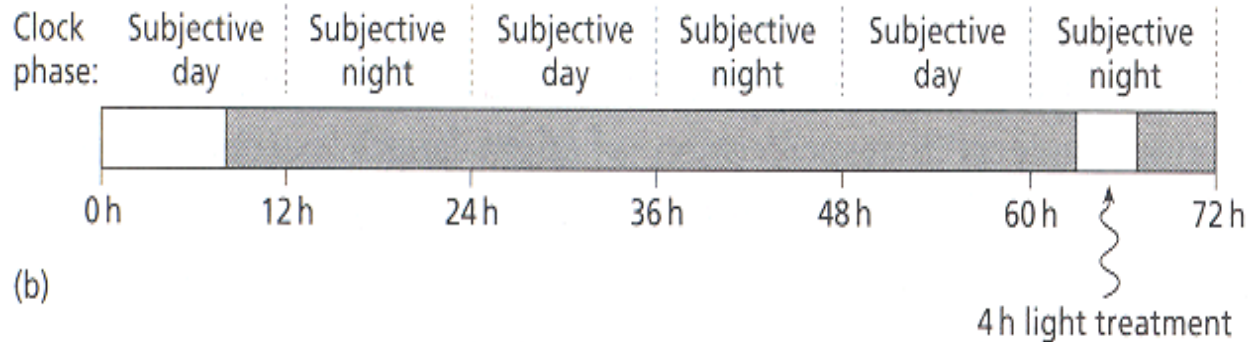
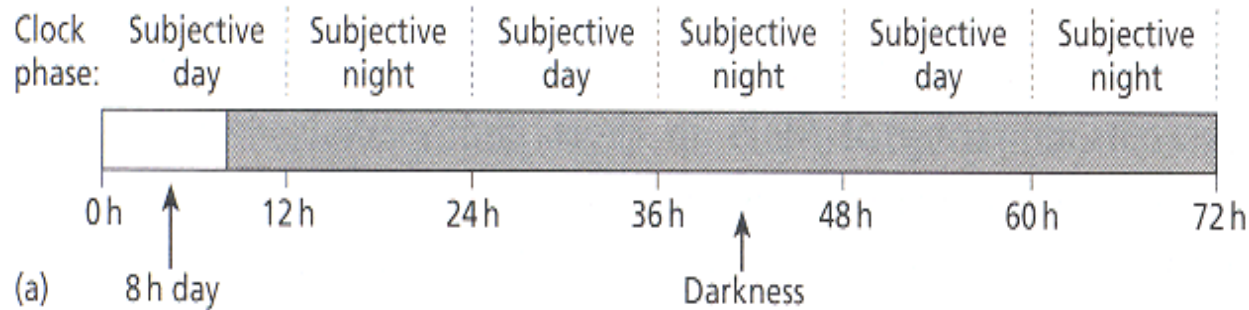
Επίδραση του φωτός στην άνθιση φυτών μικρής ημέρας και μεγάλης μέρας

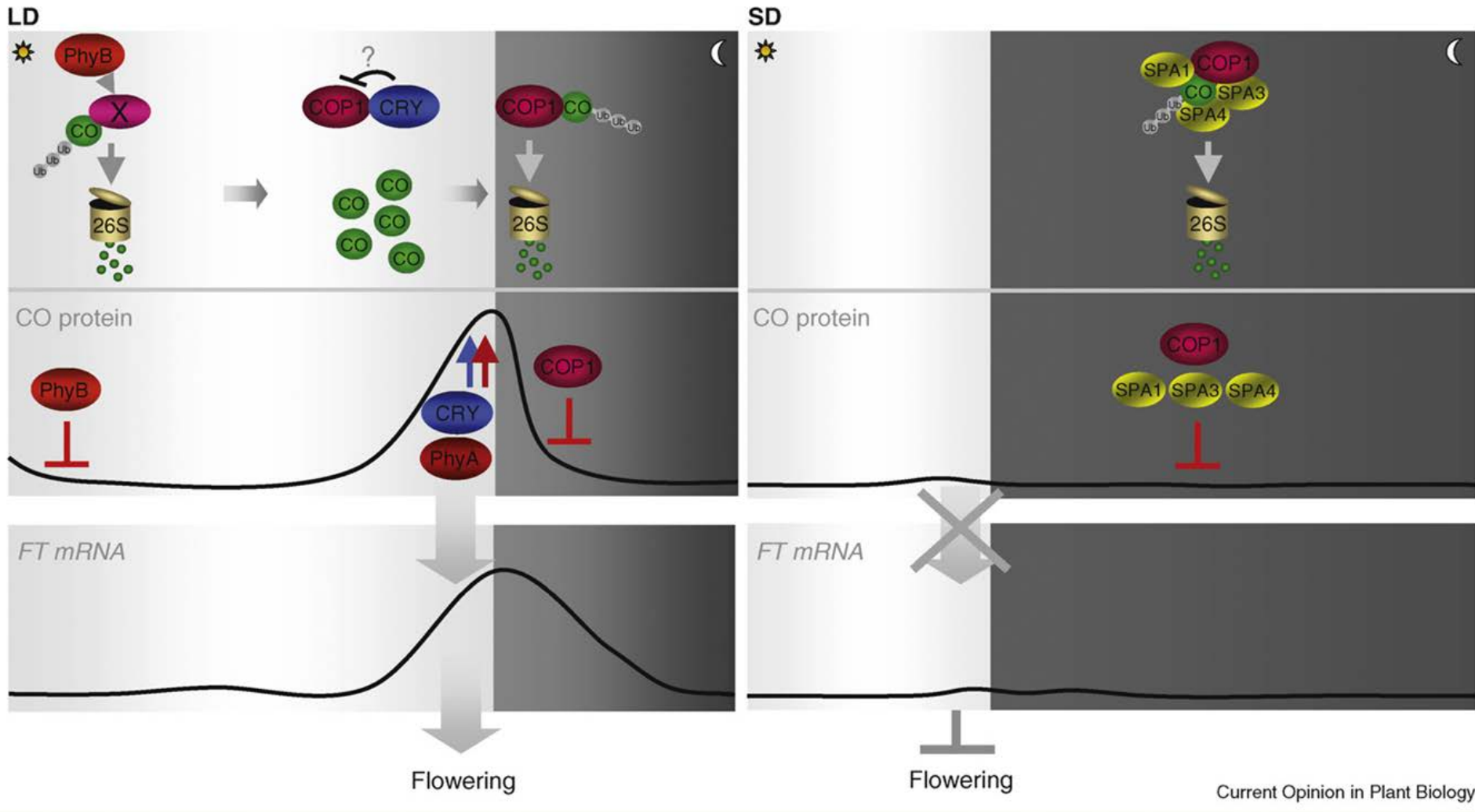
(a) Short-day plant



(b) Long-day plant







Φωτοπεριοδική ρύθμιση του επιπέδου της COSTANS (CO). Υπάρχουν δυο πιθανοί μηχανισμοί για την αποικοδόμηση της πρωτεΐνης CO σε φυτά μακράς ημέρας (LD): Ένας εξαρτώμενος από την COP1 μηχανισμός, ο οποίος λαμβάνει χώρα αργά στην ημέρα και κατά τη διάρκεια της νύχτας ή /και ένας εξαρτώμενος από το phyB μηχανισμός, ο οποίος εμφανίζεται νωρίς το πρωί ή/και κατά την έκθεση του φυτού σε κόκκινο φως. Μία ή περισσότερες E3 λιγάσες (X) μπορούν να εμπλέκονται στην αποικοδόμηση του CO νωρίς στην ημέρα. Η CO συσσωρεύεται αργά το απόγευμα και φωτοϋποδοχείς όπως οι CRY μπορούν να καταστείλουν τη δραστηριότητα της COP1. Σε βραχείας ημέρας φυτά (SD), η CO πρωτεΐνη αποικοδομείται από έναν COP1/SPAs εξαρτώμενο μηχανισμό. Το μειωμένο επίπεδο πρωτεΐνης CO δεν είναι επαρκές για να επάγει την έκφραση της FT με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της ανθοφορίας.