

ΕΙΔΙΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΛΕΞΗ 3

Το μικροβίωμα εντόμων, φυτών και ζώων

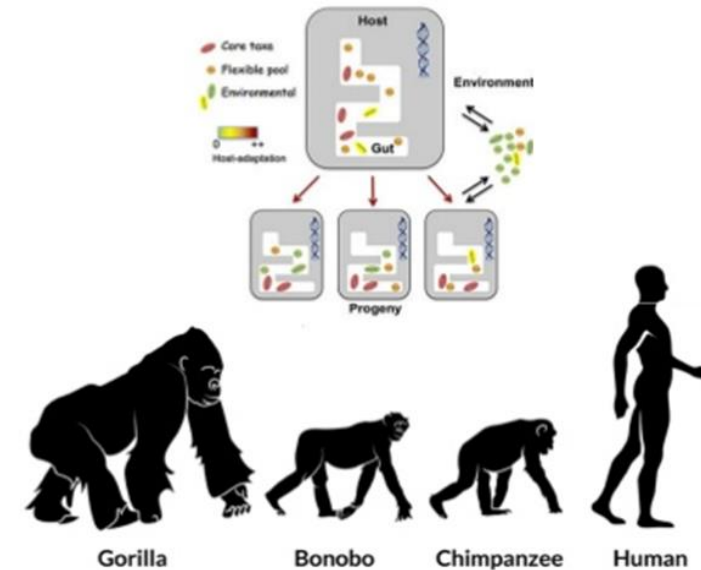
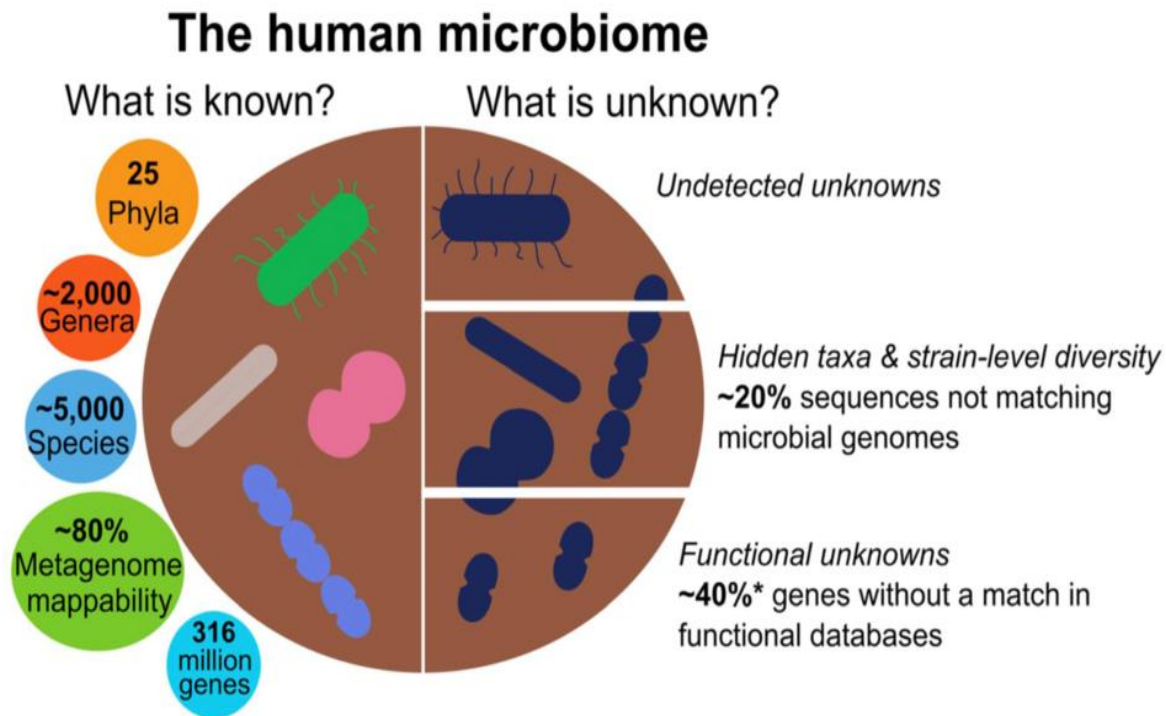
ΡΟΛΟΣ, ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ
ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ

ΔΙΔΑΣΚΟΥΣΑ: ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

Ρόλος των μικροοργανισμών στην εξέλιξη φυτών και ζώων: η θεωρία του ολογονιδιώματος

□ Η μελέτη του μικροβιώματος μεταβάλλει την αντίληψη μας για την εξέλιξη των ειδών

■ Οι μικροοργανισμοί καθορίζουν την εξέλιξη μας



Michael Shapiro. Gut Microbiota and Host Evolution – Scaling Up Symbiosis
Trends in Ecology & Evolution. 2016; 31(7): 539-549

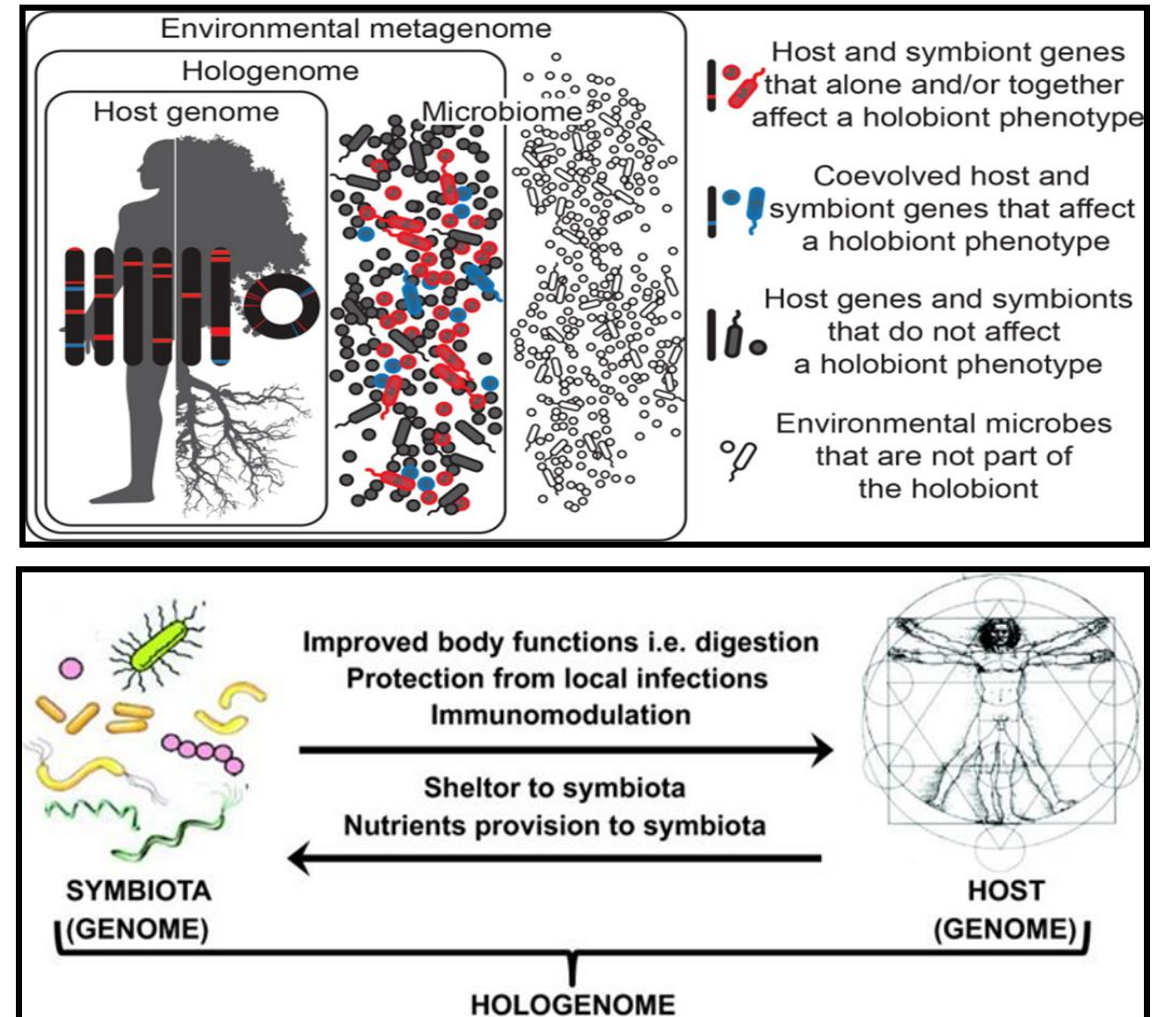
B. Ravinder Reddy

□ Οι περισσότεροι ευκαρυωτικοί οργανισμοί αναπτύσσουν στενές σχέσεις με μικροοργανισμούς που είναι απαραίτητοι για την απόδοση και την επιβίωση τους

□ Έτσι οι ευκαρυώτες και οι προκαρυώτες στη φύση μπορούν να θεωρηθούν ως μετα-οργανισμοί ή ολοβιώματα

Ρόλος των μικροοργανισμών στην εξέλιξη των φυτών και των ζώων: η θεωρία του ολογονιδιώματος

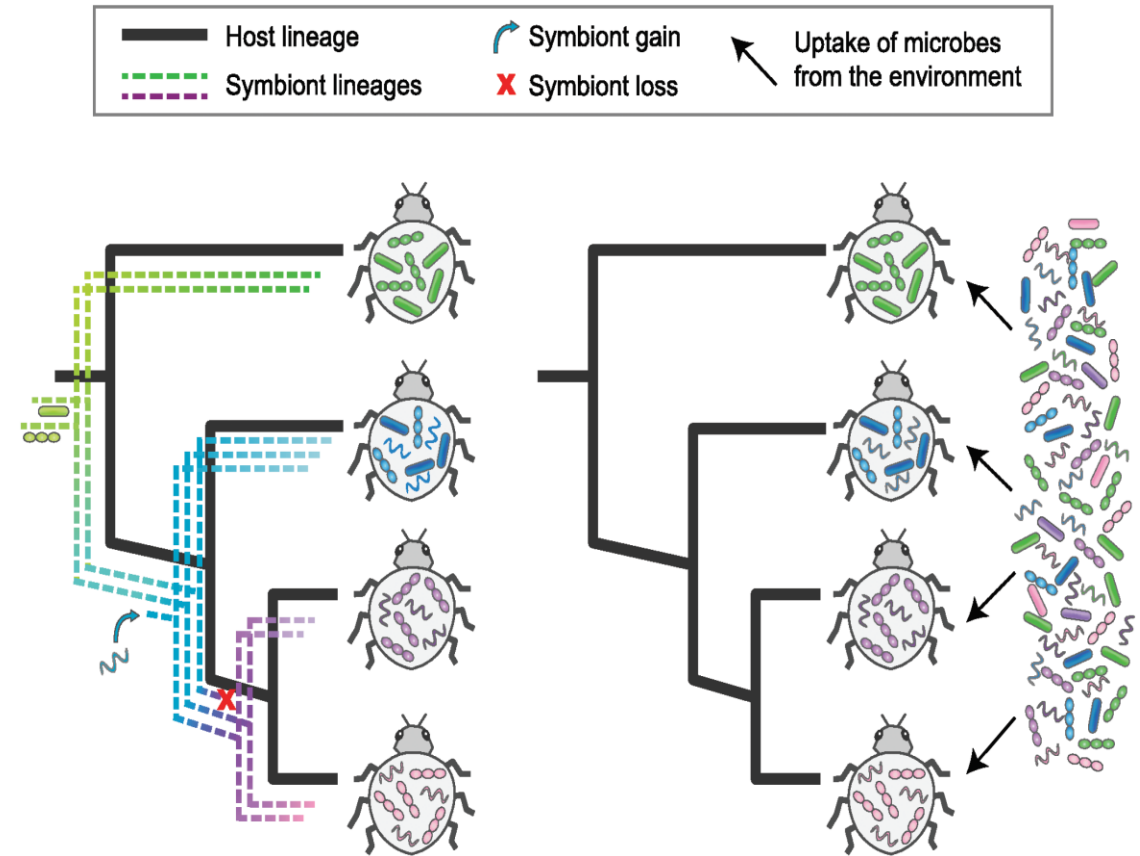
- Ως **ολογονιδίωμα** ορίζεται το σύνολο των γενετικών πληροφοριών του ξενιστή και του μικροβιώματος του
- Με βάση τη **θεωρία του ολογονιδιώματος** το ολοβίωμα (ο ξενιστής και το συμβιωτικό μικροβίωμα) με το ολογονιδίωμα του, δρουν ως κοινοπραξία και θα πρέπει να θεωρούνται ως μια ενιαία μονάδα επιλογής στην εξέλιξη
- Ως εκ τούτου η σχετικά ταχεία μεταβολή του μικροβιακού συμβιώματος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την προσαρμογή και την εξέλιξη του ολοβιώματος



Ρόλος των μικροοργανισμών στην εξέλιξη των φυτών και των ζώων: η θεωρία του ολογονιδιώματος

□ Η θεωρία του ολογονιδιώματος βασίζεται σε 4 βασικές γενικεύσεις:

1. Όλα τα ζώα και τα φυτά εδραιώνουν συμβιωτικές σχέσεις με μικροοργανισμούς
2. Οι συμβιωτικοί μικροοργανισμοί μεταβιβάζονται από γενιά σε γενιά
3. Η σχέση μεταξύ ξενιστή και συμβιώματος επηρεάζει την προσαρμοστική ικανότητα του ολοβιώματος
4. Μεταβολές του ολογονιδιώματος μπορούν να προκύψουν από αλλαγές που επιτελούνται είτε στο γονιδίωμα του ξενιστή είτε στο μικροβιακό γονιδίωμα – σε συνθήκες περιβαλλοντικού στρες η συμβιωτική μικροβιακή κοινότητα μπορεί να μεταβληθεί ταχύτατα

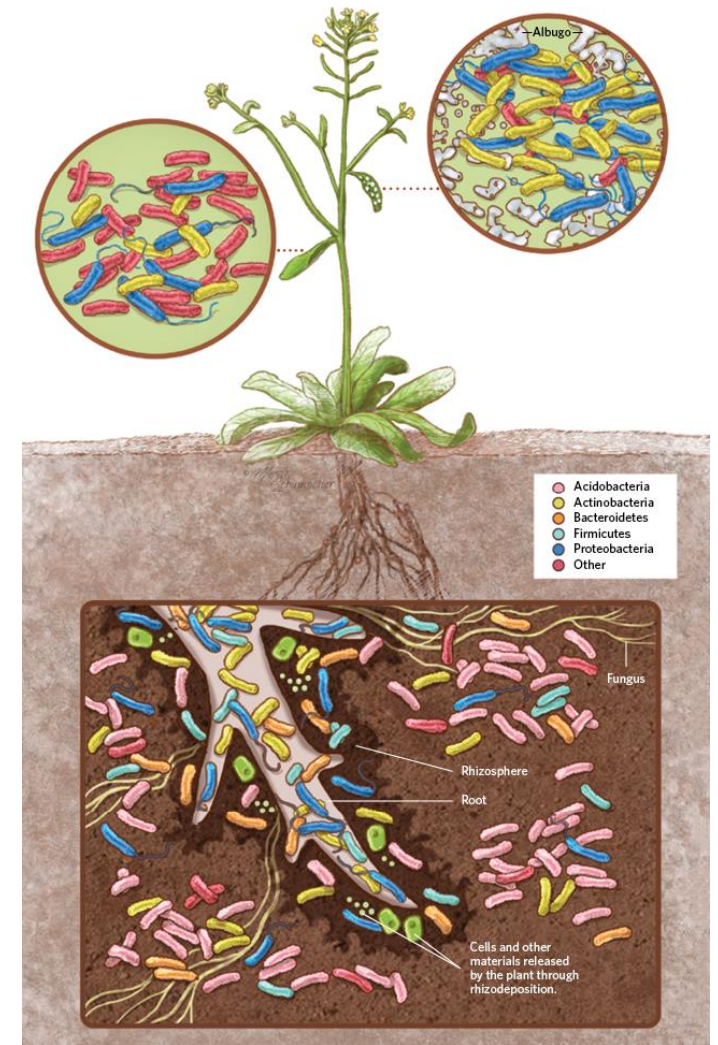


Ρόλος των μικροοργανισμών στην εξέλιξη φυτών και ζώων: η θεωρία του ολογονιδιώματος

Ολοβίωμα	Τρόπος μετάδοσης μικροβιώματος	Συνεισφορά μικροβιώματος
<p>Τερμίτες και μικροβίωμα του εντέρου</p> 	<p>Οι νεοεκκολαπτόμενες προνύμφες τρέφονται με τα αποχωρήματα των ενήλικων τερμιτών</p>	<p>Ενέργεια και άνθρακας, μεταβολισμός αζώτου, αναγνώριση από την οσμή των μεταβολιτών που παράγουν τα βακτήρια</p>
<p>Καλαμάρι και <i>Vibrio fischeri</i></p> 	<p>Από το περιβάλλον</p>	<p>Καμουφλάζ: προστασία από άρπαγες</p>
<p>Άνθρωπος, ποντίκι και εντερικό μικροβίωμα</p> 	<p>Από το περιβάλλον, με φυσική επαφή</p>	<p>Προστασία από παθογόνα, ενεργοποίηση ανοσοποιητικού, συνθεση βιταμινών, διάσπαση φυτικών ινών, αποθήκευση λίπους</p>
<p>Χερσαία φυτά-Μυκκοριζικοί μύκητες</p> 	<p>Διαμέσου σπορίων στο έδαφος και εκβλάστησης</p>	<p>Παροχή θρεπτικών από το έδαφος</p>
<p>Μη φωτοσυνθετικά φυτά-Μύκητες</p> 	<p>Διαμέσου σπορίων στο έδαφος και εκβλάστησης</p>	<p>Παροχή θρεπτικών από το έδαφος και οργανικών συστατικών από άλλα φυτά</p>
<p>Ψυχανθή – <i>Rhizobium</i></p> 	<p>Από το γειτονικό περιβάλλον</p>	<p>Αζωτοδέσμευση</p>

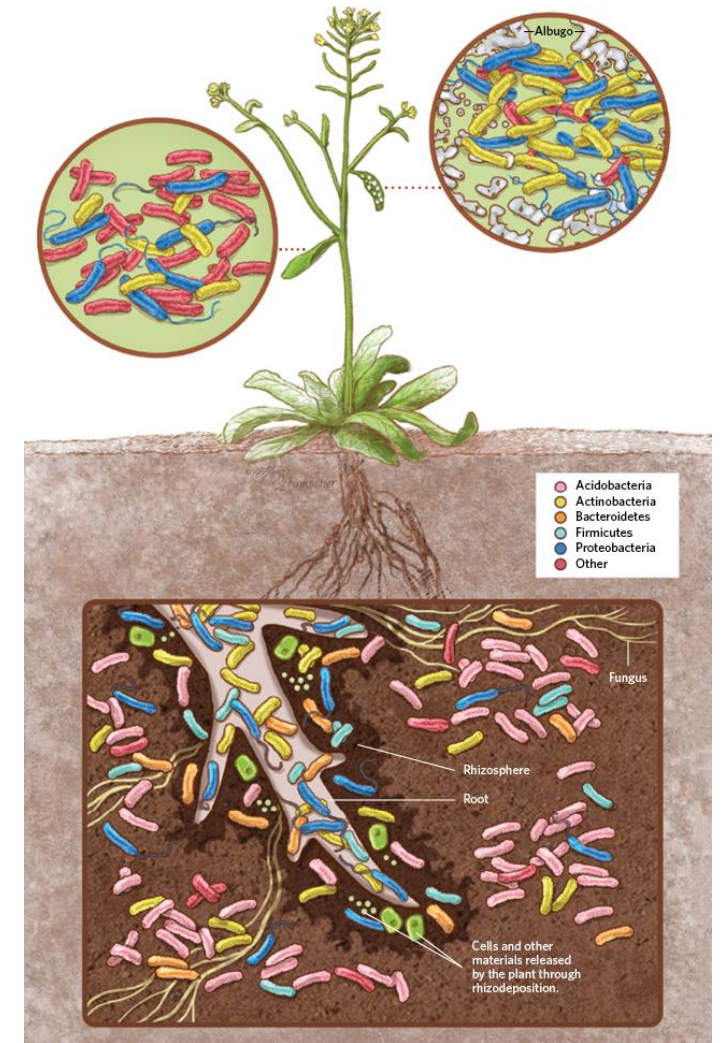
Το μικροβίωμα των φυτών

- ❑ Τα φυτά χρησιμεύουν ως ξενιστής για μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών
- ❑ Καθώς τα φυτά δεν μπορούν να μετακινηθούν αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις στην πρόσληψη των απαραίτητων θρεπτικών από ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ ταυτόχρονα αμύνονται εναντίον εχθρών και παθογόνων και έρχονται αντιμέτωπα με συνθήκες αβιοτικού στρες όπως ξηρασία, αλατότητα και ξενοβιοτικές ουσίες – ρύποι
- ❑ Το μικροβίωμα των φυτών βοηθά τα φυτά να αντιμετωπίσουν όλες αυτές τις προκλήσεις
- ❑ Καθώς η γενετική προσαρμογή των φυτών πραγματοποιείται αργά είναι εξαιρετικά σημαντικό για τα φυτά να διαθέτουν κατάλληλο μικροβίωμα που να τα βοηθά να προσαρμόζονται στις ταχέως μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες



Το μικροβίωμα των φυτών

- ❑ Τα φυτά χρησιμεύουν ως ξενιστής για μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών
- ❑ Το μικροβίωμα των φυτών είναι καθοριστικής σημασίας για την υγεία και την αποδοτικότητα των φυτών και μπορεί να ενισχύσει-προωθήσει:
 - Φυτική αύξηση
 - Αντοχή σε ξηρασία
 - Αμυνα έναντι των παθογόνων
 - Περιβαλλοντική αποκατάσταση



Το μικροβίωμα πυρήνας και το δορυφορικό μικροβίωμα

□ Μικροβίωμα πυρήνας

- Οι μικροοργανισμοί που είναι στενά συνδεδεμένοι με συγκεκριμένα είδη φυτών ή γενότυπους, ανεξάρτητα από τις εδαφικές και περιβαλλοντικές συνθήκες ορίζονται ως μικροβίωμα πυρήνας
- Περιλαμβάνει ταξινομικές ομάδες σημαντικές για την προσαρμοστική ικανότητα του φυτού, που έχουν εδραιωθεί διαμέσου εξελικτικών μηχανισμών επιλογής και εμπλουτισμού των μικροβιακών ταξινομικών ομάδων που φέρουν λειτουργικά γονίδια για τη συνολική προσαρμοστικότητα του ολοβιώματος των φυτών

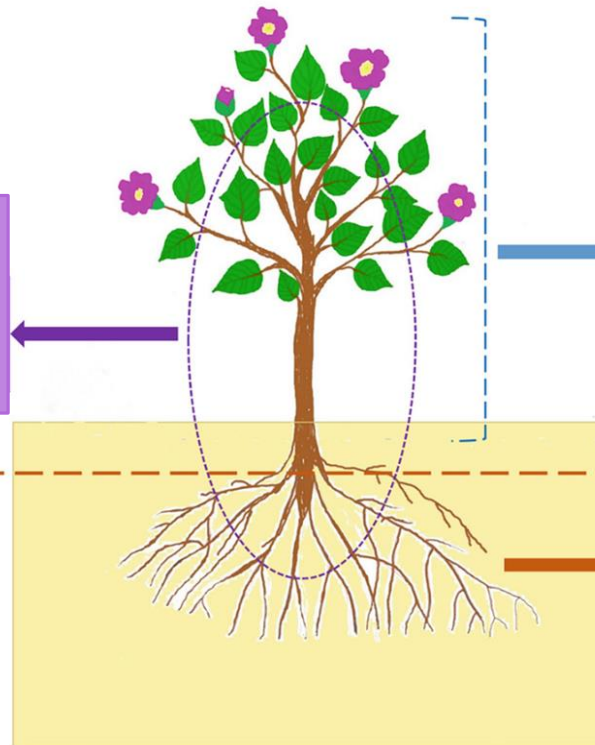
□ Δορυφορικό μικροβίωμα

- Οι μικροβιακές ταξινομικές ομάδες που εμφανίζονται σε χαμηλή αφθονία και σε περιορισμένα σημεία αποτελούν το δορυφορικό μικροβίωμα
- Το δορυφορικό μικροβίωμα καθορίζεται από το γεωγραφικό εύρος, την τοπική αφθονία και την εξειδίκευση ως προς το ενδιαίτημα
- Παρά τη χαμηλή αφθονία του φαίνεται να είναι σημαντικό για συγκεκριμένες λειτουργίες του οικοσυστήματος, όπως:
 - ✓ Ο περιορισμός ανεπιθύμητων μικροβιακών εισβολών στις εδαφικές κοινότητες
 - ✓ Η παραγωγή αντιβιοτικών πτητικών ουσιών για την προστασία των φυτών από εδαφογενή παθογόνα

Το μικροβίωμα των φυτών

- ❑ Όλοι οι ιστοί ενός φυτού φιλοξενούν μικροοργανισμούς: εξωτερικοί (ριζόσφαιρα και φυλλόσφαιρα) και εσωτερικοί (ενδόσφαιρα)
- ❑ Τα μικρόβια της φυλλόσφαιρας και της ριζόσφαιρας θεωρούνται επιφυτικά (πλησίον ή πάνω στους φυτικούς ιστούς), ενώ αυτά που εντοπίζονται μέσα στους φυτικούς ιστούς (την ενδόσφαιρα), των φύλλων, των ριζών ή των βλαστών θεωρούνται ενδοφυτικά

Ενδόσφαιρα: περιλαμβάνει τους εσωτερικούς ιστούς του φυτού που φιλοξενούν ενδοφυτικούς μύκητες και βακτήρια

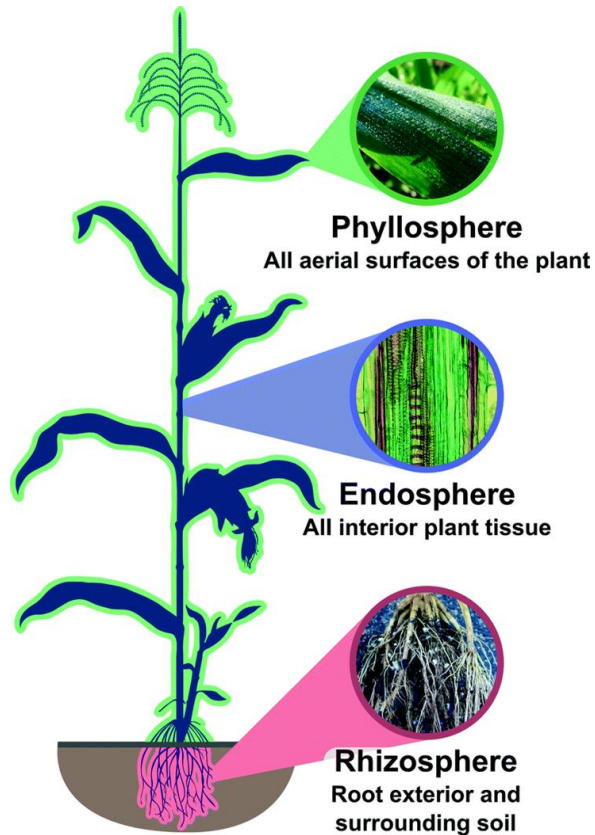


Φυλλόσφαιρα: η εξωτερική επιφάνεια του φυτού που φιλοξενεί επιφυτικούς μύκητες και βακτήρια

Ριζόσφαιρα: η περιοχή γύρω από τις ρίζες του φυτού που φιλοξενεί ριζοβακτήρια, μυκορριζικούς μύκητες και νηματώδεις

Το μικροβίωμα των φυτών

- Όλοι οι ιστοί ενός φυτού φιλοξενούν μικροοργανισμούς: εξωτερικοί (ριζόσφαιρα και φυλλόσφαιρα) και εσωτερικοί (ενδόσφαιρα)



Η φυλλόσφαιρα χαρακτηρίζεται από τη χαμηλή παρουσία θρεπτικών και υπόκειται σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας, ακτινοβολίας και υγρασίας

Η ενδόσφαιρα φιλοξενεί τμήμα του μικροβιώματος της ριζόσφαιρας => αυξημένη πίεση επιλογής για το εσωτερικό του φυτού

Η ριζόσφαιρα χαρακτηρίζεται από υψηλή μικροβιακή ποικιλότητα και επηρεάζεται από την απόθεση βλενωδών φυτικών παραγώγων και ριζικών εκκρίσεων

- Οι μικροοργανισμοί στα ενδιαίτηματα αυτά μπορούν να σχηματίσουν σχέσεις συνεργασίας - αμοιβαιότητας, ουδετερότητας ή ανταγωνισμού με τα φυτά ξενιστές τους

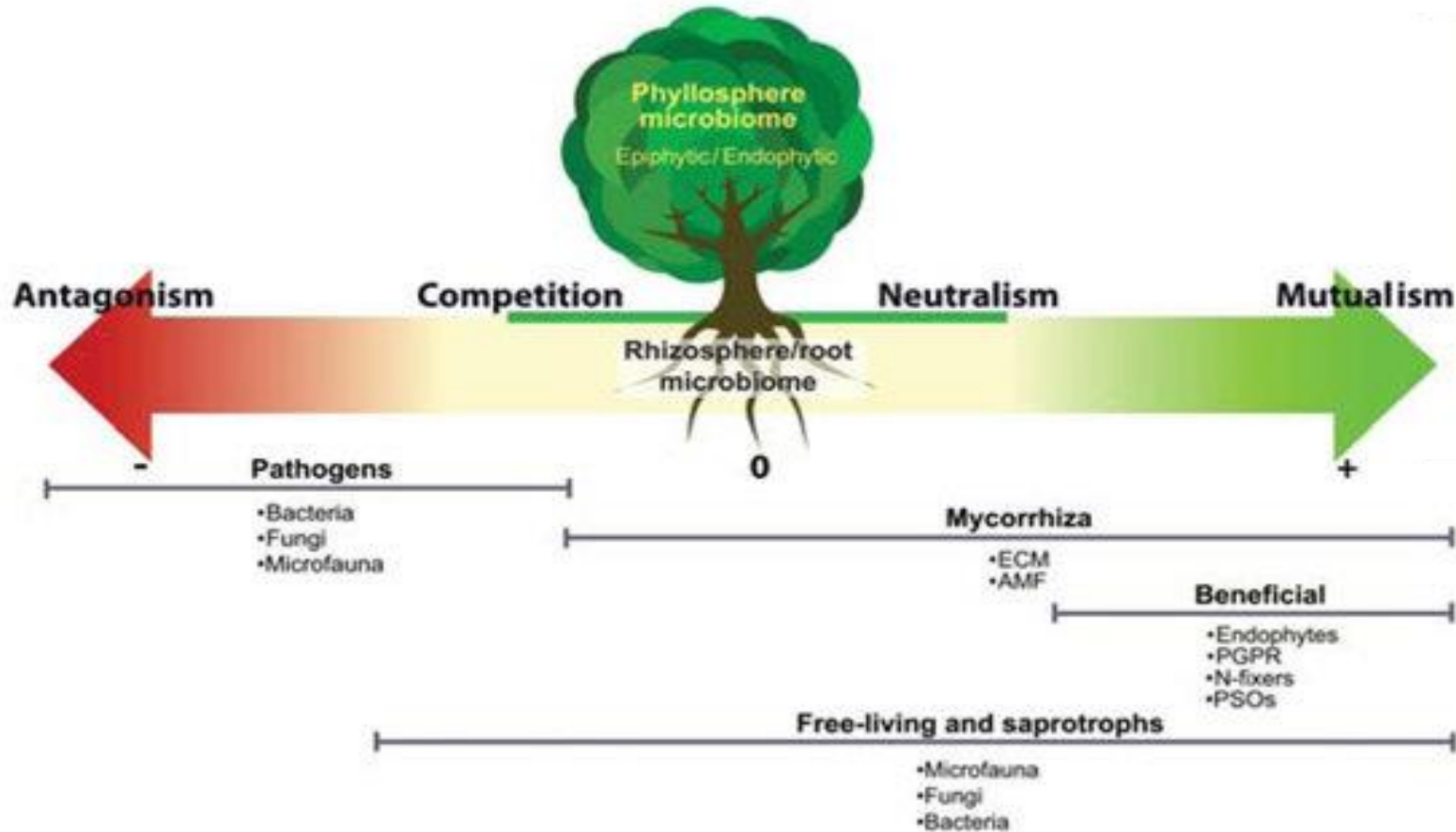
- Φυτά μοντέλα και γνωστές συμβιωτικές σχέσεις

Π.χ. συμβίωση *Rhizobium*-ψυχανθή

- Το μικροβίωμα των φυτών και η συνεισφορά του στο φαινότυπο το φυτού παραμένουν σε μεγάλο βαθμό άγνωστα
- Το μικροβίωμα επηρεάζεται ισχυρά από το γονιδίωμα του φυτού

Το μικροβίωμα των φυτών

- Όλοι οι ιστοί ενός φυτού φιλοξενούν μικροοργανισμούς: εξωτερικοί (ριζόσφαιρα και φυλλόσφαιρα) και εσωτερικοί (ενδόσφαιρα)



- Οι μικροοργανισμοί στα ενδιαίτηματα αυτά μπορούν να σχηματίσουν σχέσεις συνεργασίας - αμοιβαιότητας, ουδετερότητας ή ανταγωνισμού με τα φυτά ξενιστές τους

- Φυτά μοντέλα και γνωστές συμβιωτικές σχέσεις

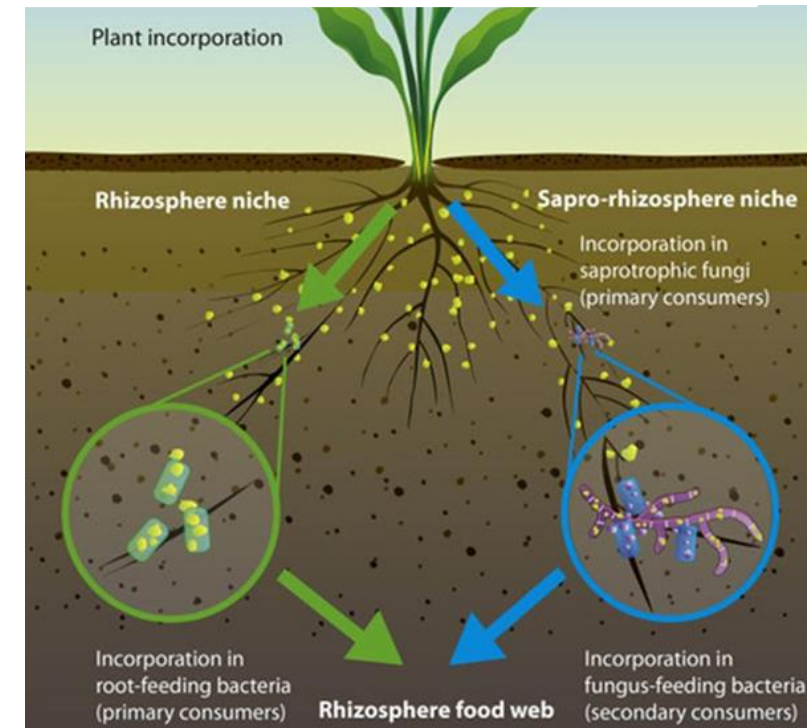
Π.χ. συμβίωση *Rhizobium*-ψυχανθή

- Το μικροβίωμα των φυτών και η συνεισφορά του στο φαινότυπο το φυτού παραμένουν σε μεγάλο βαθμό άγνωστα
- Το μικροβίωμα επηρεάζεται ισχυρά από το γονιδίωμα του φυτού

Το μικροβίωμα των φυτών - Ριζόσφαιρα

□ Το περιβάλλον της ριζόσφαιρας

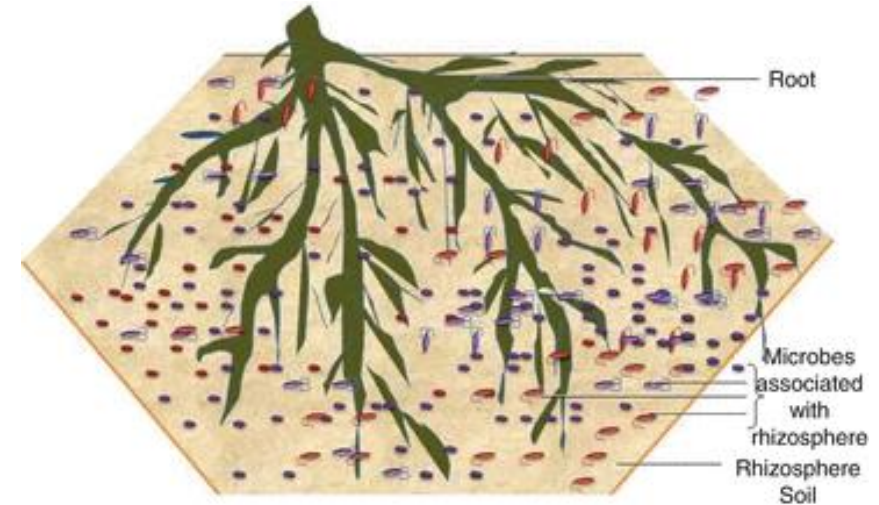
- Η ριζόσφαιρα είναι περιοχή εκείνη του εδάφους γύρω από τις ρίζες των φυτών που επηρεάζεται από την απόθεση βλενωδών φυτικών παραγώγων, ριζικών εκκρίσεων και απεκρίσεων φυτικών κυττάρων
- Οι ριζικές εκκρίσεις περιέχουν ποικιλία ενώσεων, κυρίως οργανικά οξέα και σάκχαρα αλλά και αμινοξέα, λιπαρά οξέα, βιταμίνες αυξητικούς παράγοντες, ορμόνες και αντιμικροβιακές ενώσεις
- Οι ριζικές εκκρίσεις καθορίζουν τη δομή του μικροβιώματος της ριζόσφαιρας
- Η χημική σύσταση των ριζικών εκκρίσεων ποικίλει μεταξύ των διαφορετικών ειδών και ποικιλιών φυτών, αλλά και με την ηλικία του φυτού και το στάδιο ανάπτυξης, ενώ επηρεάζεται και από τη δομή του μικροβιώματος



Το μικροβίωμα των φυτών - Ριζόσφαιρα

□ Το περιβάλλον της ριζόσφαιρας

- Η απέκκριση ριζικών κυττάρων και η απόθεση βλενωδών φυτικών παραγώγων οδηγεί στην συγκέντρωση στην περιοχή της ριζόσφαιρας υλικών όπως πολυμερή των κυτταρικών τοιχωμάτων των φυτικών κυττάρων, όπως η κυτταρίνη και η πηκτίνη
- Η αποδόμηση της **κυτταρίνης** πραγματοποιείται ευρέως από τους μικροοργανισμούς που φιλοξενούνται σε εδάφη με υψηλή οργανική ύλη
- Η αποδόμηση της **πηκτίνης** οδηγεί στην παραγωγή μεθανόλης που μπορεί με τη σειρά της να χρησιμοποιηθεί ως πηγή άνθρακα από άλλους μικροοργανισμούς
- Οι ρίζες των φυτών εκτός από την **παροχή άνθρακα** χρησιμεύουν στους μικροοργανισμούς ως **επιφάνεια προσκόλλησης**



Στο μικροβίωμα της ριζόσφαιρας επικρατούν συνήθως α - και β - Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes, Planctomycetes, Verrucomicrobia και Acidobacteria

Το μικροβίωμα της ριζόσφαιρας



Το μικροβίωμα των φυτών - Ριζόσφαιρα

❑ Ωφέλιμοι μικροοργανισμοί = “The good”

- Δράση ως βιολογικά λιπάσματα
- Ενίσχυση της αύξησης των ριζών
- Έλεγχος αβιοτικού στρες
- Προστασία από παθογόνα

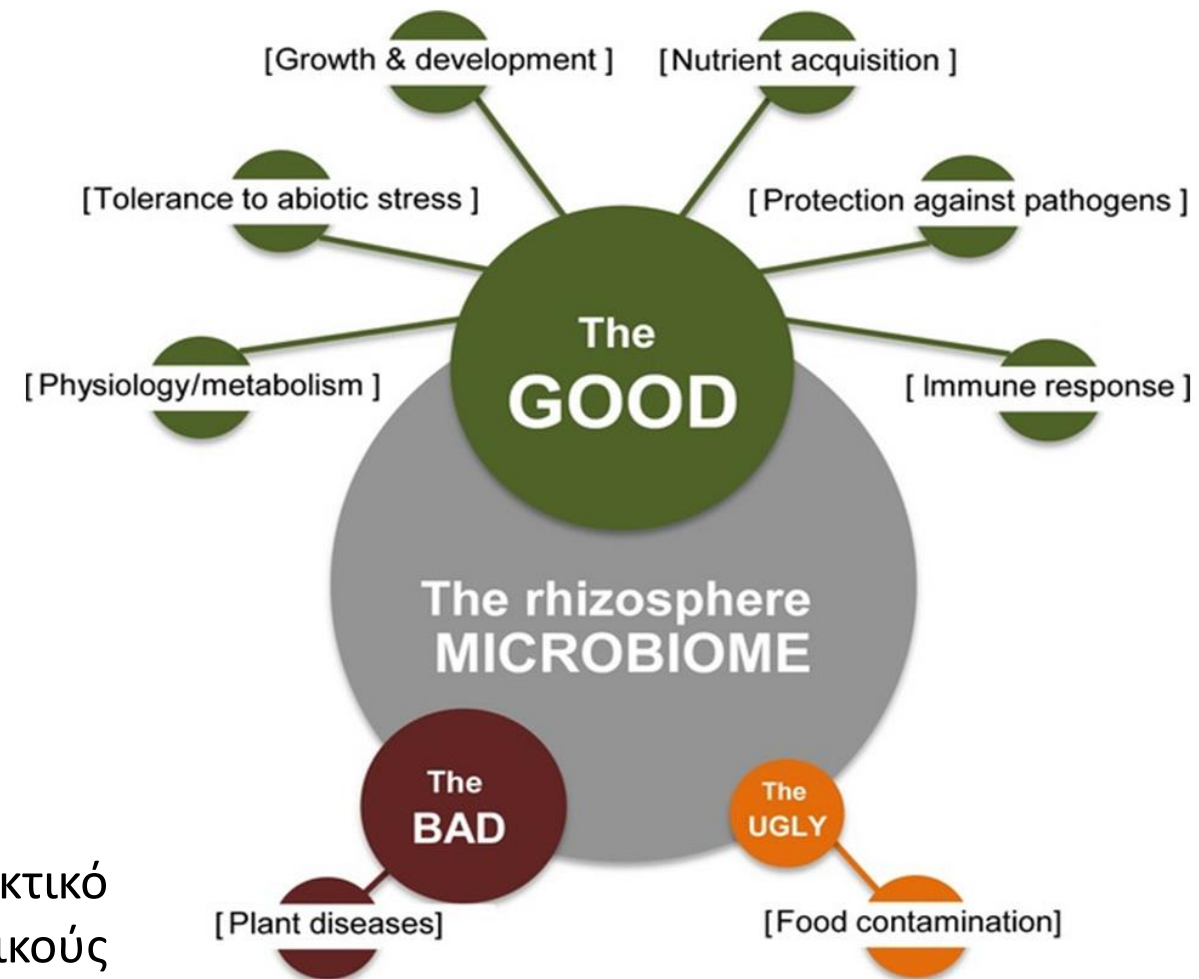
❑ Εδαφογενή φυτοπαθογόνα= “The bad”

- Νηματώδεις
- Μύκητες
- Ωομύκητες
- Βακτήρια

Μείωση φυτικής παραγωγής

❑ Παθογόνα για τον άνθρωπο και τα ζώα = “The ugly”

- Επιβιώνουν στο έδαφος
- Αποικίζουν τα φυτά τα οποία χρησιμοποιούν ως εναλλακτικό ξενιστή και ως μέσο για να εισέλθουν ξανά στους αρχικούς ξενιστές τους
- Είσοδος στην τροφική αλυσίδα



Το μικροβίωμα των φυτών - Ριζόσφαιρα

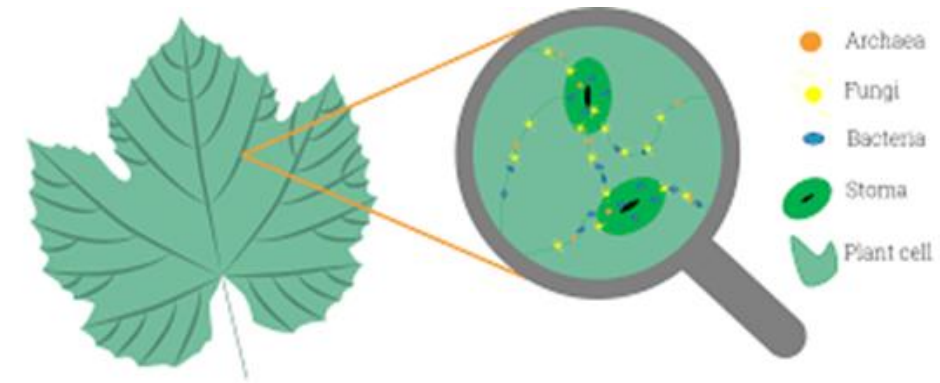
□ Το περιβάλλον της ριζόσφαιρας – Μικροοργανισμοί με ιδιαίτερο ενδιαφέρον

- **Ριζοβακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης** (plant growth-promoting rhizobacteria-PGPR)
- Πολλά PGPR δρουν **ανταγωνιστικά έναντι παθογόνων** των φυτών παράγοντας ουσίες με αντιμικροβιακή δράση ή αλληλεπιδρώντας με τους παράγοντες της παθογένεσης
- **Αζωτοδεσμευτικά βακτήρια**, συμπεριλαμβανομένων των ελεύθερα διαβιούντων (π.χ. *Azotobacter* spp.) και των συμβιωτικών (όπως *Rhizobium* spp.), που παρέχουν το δεσμευμένο άζωτο στα φυτά
- Βακτήρια που μπορούν και **διαλυτοποιούν ορυκτά που περιέχουν φώσφορο** αυξάνοντας έτσι τη βιοδιαθεσιμότητα του
- Οι **Ακτινομύκητες**, μια από τις επικρατέστερες ομοταξίες βακτηρίων στο έδαφος και στη ριζόσφαιρα παράγουν μεγάλο εύρος ουσιών με **αντιμικροβιακές, νηματωδοκτόνες και εντομοκτόνες ιδιότητες**
- Άλλα βακτήρια μπορούν επίσης και δρουν ανταγωνιστικά σε παθογόνα όπως το *Pseudomonas fluorescens*, που παράγει την ουσία diacetylphloroglucinol με δράση κατά των μυκήτων

Το μικροβίωμα των φυτών -Φυλλόσφαιρα

□ Το περιβάλλον της φυλλόσφαιρας

- Ο μικροβιακός αποικισμός των φύλλων **δεν είναι ομοιογενής** αλλά επηρεάζεται από χαρακτηριστικά των φύλλων όπως τα νεύρα, τα τριχίδια και τα στόματα
- Η επιφάνεια των φύλλων φιλοξενεί έως 10^7 μικρόβια ανα cm^2
- Η φυλλόσφαιρα είναι πολύ πιο δυναμικό περιβάλλον από τη ριζόσφαιρα και οι μικροοργανισμοί που φιλοξενεί υπόκεινται σε μεγάλες **διακυμάνσεις** της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ημέρας και νύχτας
- Οι παραπάνω αβιοτικοί παράγοντες επηρεάζουν και **έμμεσα** το μικροβίωμα της φυλλόσφαιρας λόγω αλλαγών στο μεταβολισμό του φυτού
- Οι κατακρημνίσεις και ο αέρας θεωρείται ότι συνεισφέρουν στην εποχική διακύμανση των μικροοργανισμών της φυλλόσφαιρας

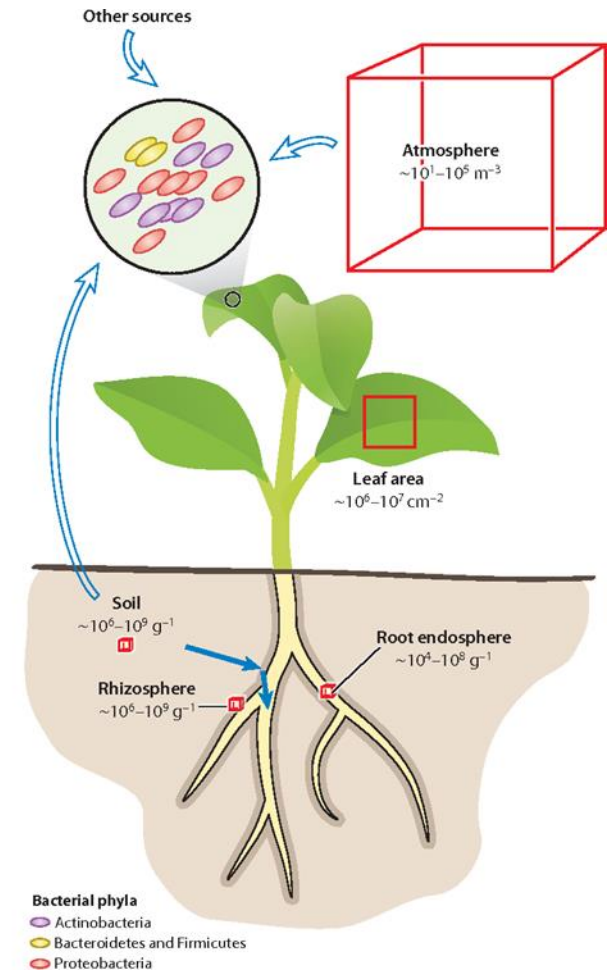


- Το μεταβολικό προφίλ των φύλλων του *A. thaliana* μεταβλήθηκε μετά από εφαρμογή εδαφικών μικροοργανισμών στη ριζόσφαιρα
- Η αυξημένη συγκέντρωση διαφόρων αμινοξέων στο metabolome των φύλλων συσχετίστηκε με αυξημένη προσβολή του φυτού από έντομα
- **cross-talk ανάμεσα στα υπόγεια και υπέργεια τμήματα του φυτού**

Το μικροβίωμα των φυτών -Φυλλόσφαιρα

□ Το περιβάλλον της φυλλόσφαιρας

- Μεγαλύτερη μικροβιακή ποικιλότητα παρατηρείται σε θερμά και υγρά κλίματα
- Κυριαρχούν τα α- και γ-Proteobacteria, ενώ συχνά απαντώνται και τα Bacteroidetes και Actinobacteria
- Στη Μεσόγειο στη φυλλόσφαιρα πολλών φυτών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού βρέθηκαν να επικρατούν τα βακτήρια του γαλακτικού οξέος (Firmicutes) που ο μεταβολισμός τους επιτρέπει να επιβιώνουν σε υγρά και θερμά κλίματα
- Στις υψηλότερες ταξινομικά βαθμίδες το μικροβίωμα της φυλλόσφαιρας των διαφορετικών φυτών παρουσιάζει ομοιότητες, αλλά σε επίπεδο είδους και στελέχους οι διαφορές στη μικροβιακή σύσταση είναι έντονες αντικατοπτρίζοντας τις **μεταβολικές προσαρμογές** που απαιτούνται για την επιβίωση σε ένα τέτοιο περιβάλλον

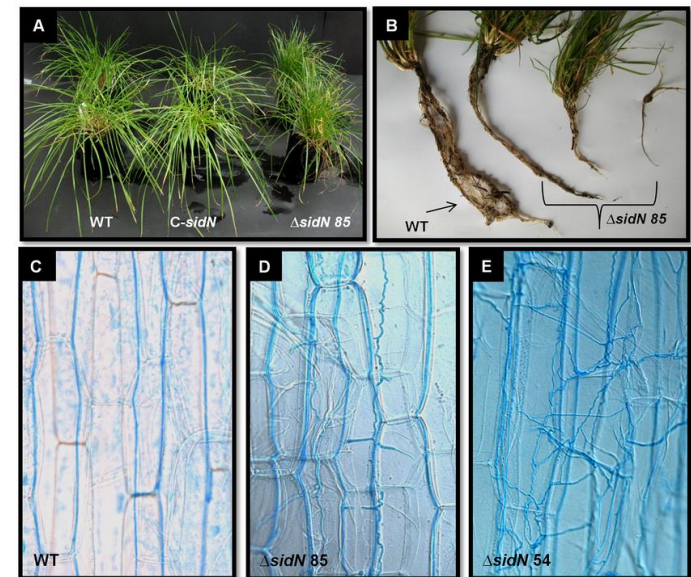
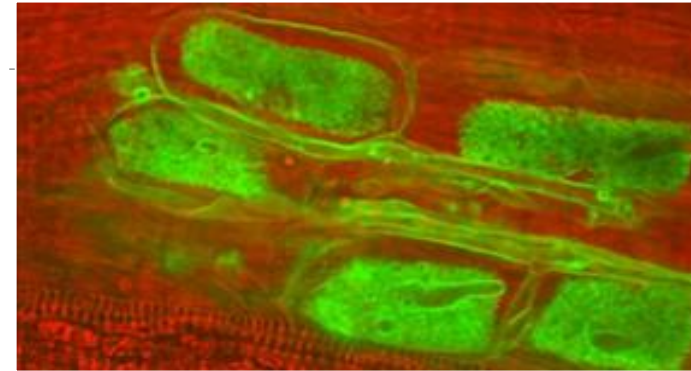


Αν και το μικροβίωμα της ριζόσφαιρας παρουσιάζει ομοιότητες με αυτό του εδάφους, κάτι ανάλογο δεν παρατηρείται μεταξύ του μικροβιώματος της φυλλόσφαιρας και του αέρα

Το μικροβίωμα των φυτών - Ενδόσφαιρα

□ Το περιβάλλον της ενδόσφαιρας

- Οι ενδοφυτικοί μικροοργανισμοί περνούν τουλάχιστον ένα μέρος της ζωής του μέσα στους φυτικούς ιστούς
- Γενικά θεωρούνται μη παθογόνοι αλλά περιλαμβάνουν είδη που υπό προϋποθέσεις (π.χ. περιβαλλοντικές συνθήκες, γενότυπος ξενιστή) θα μπορούσαν να προκαλέσουν ασθένειες
- Οι ενδοφυτικοί μικροοργανισμοί θεωρούνται **υποπληθυσμός του μικροβιώματος της ριζόσφαιρας** αλλά διαθέτουν χαρακτηριστικά διακριτά από αυτούς => δεν μπορούν όλοι οι μικροοργανισμοί της ριζόσφαιρας να εισέλθουν στο φυτό και/ή όταν εισέρχονται στον ξενιστή τους μεταβάλλουν τον μεταβολισμό τους και προσαρμόζονται στο εσωτερικό περιβάλλον
- Τα ενδοφυτικά βακτήρια απαντώνται στο διακυτταρικό αποπλάστη, σε νεκρά κύτταρα, στα αγγεία του ξυλώματος μέσω των οποίων πρέπει να μεταφέρονται από τις ρίζες στα υπέργεια τμήματα του φυτού



Το μικροβίωμα των φυτών - Ενδόσφαιρα

□ Το περιβάλλον της ενδόσφαιρας

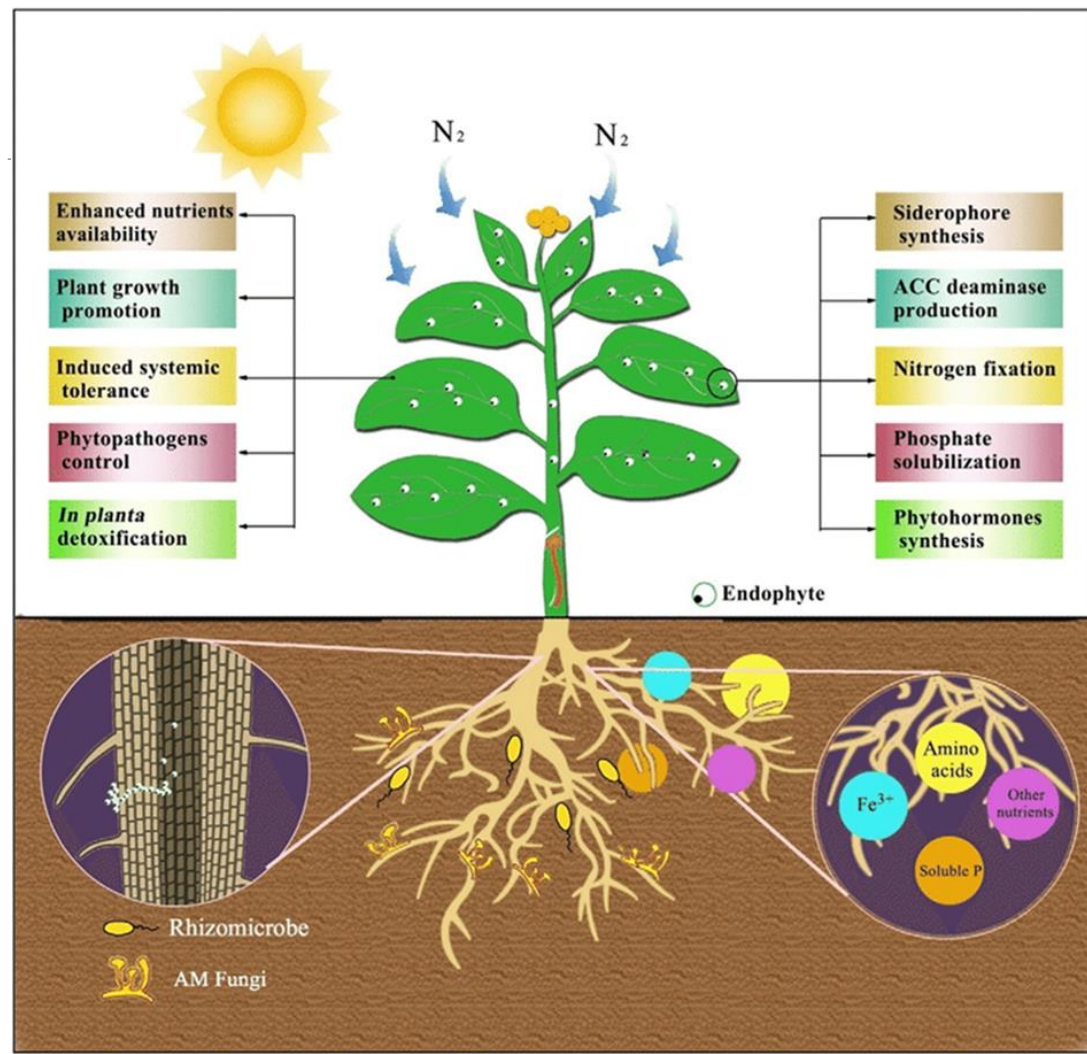
□ Πως όμως οι μικροοργανισμοί αυτοί εισέρχονται στους ξενιστές τους;

- Διαμέσου των κόμβων των πλευρικών ριζών
 - Μέσω φυσικών ρωγμών στις ρίζες και τα ακρορίζια
 - Μέσω φυτικού πολλαπλασιασμού
- Παθητική είσοδος
- Ορισμένα ενδοφυτικά βακτήρια εκφράζουν ένζυμα για την αποδόμηση των κυτταρικών τοιχωμάτων => **Ενεργητική είσοδος**

Το μικροβίωμα των φυτών - Ενδόσφαιρα

□ Μικροβίωμα της ενδόσφαιρας και ωφέλη για τα φυτά

- Ενδοφυτικά αζωτοδεσμευτικά βακτήρια (κυρίως σε αγρωστώδη) – έκφραση του γονιδίου και της πρωτεΐνης της νιτρογενάσης (*nif*)- δέσμευση αζώτου και μεταφορά του στο φυτό ξενιστή
- Ενδοφυτικά βακτήρια με χαρακτηριστικά που προάγουν την αύξηση των φυτών, όπως παραγωγή ορμονών (indoles, auxins), διαλυτοποίηση φωσφορικών, σιδηροφόρους, 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (**ACC deaminase**) (σχετίζεται με τη μείωση των επιπέδων αιθυλενίου στα φυτά => φυτά πιο ανθεκτικά σε συνθήκες στρες)
- Ορισμένα ενδοφυτικά βακτήρια είναι πιθανότερο να συνδιάζουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά συγκριτικά με τα αντίστοιχα επιφυτικά της φυλλόσφαιρας ή της ριζόσφαιρας στο ίδιο φυτό



=>Ανθεκτικότητα σε προσβολές από παθογόνα

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί μύκητες

- ❑ Οι μυκορριζικοί μύκητες σχηματίζουν συμβιωτικές σχέσεις με τα φυτά : προσβάλλουν τις ρίζες των φυτών χωρίς ωστόσο να προκαλούν κάποιο είδος βλάβης στο ριζικό σύστημα των φυτών
- ❑ Απαντώνται στη ριζόσφαιρα των περισσότερων φυτών και σχηματίζουν σχέσεις με όλα τα γυμνόσπερμα, με > 83% των δικοτυλήδων και > 79% των μονοκοτυλήδων φυτών

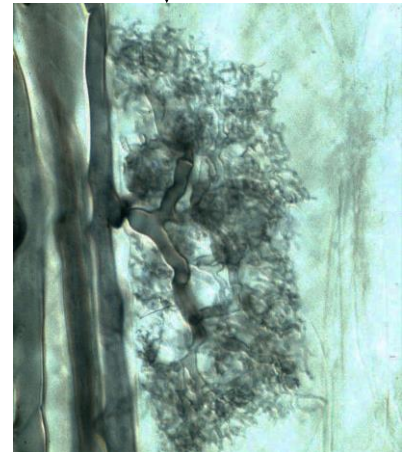
❑ Εκτομυκκόριζες:

- Κυρίως Basidiomycetes, αλλά και ορισμένοι Ascomycetes και Zygomycetes
- Παρατηρούνται στις ρίζες δασικών δένδρων όπως πεύκα, έλατα



❑ Ενδομυκκόριζες:

- **Glomeromycetes** (φύλο Glomeromycota) - υποχρεωτικά συμβιωτικοί μικροοργανισμοί
- Δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες (ΔΜΜ) (ενδοκυτταρικά όργανα=**arbuscules**)



Οι μυκορριζικοί μύκητες σχηματίζουν τις δομές τους είτε εξωτερικά της ρίζας των φυτών (εκτομυκκόριζες - ριζόσφαιρα) ή στο εσωτερικό της ρίζας των φυτών (ενδομυκκόριζες - ενδόσφαιρα)

Το μικροβίωμα των φυτών

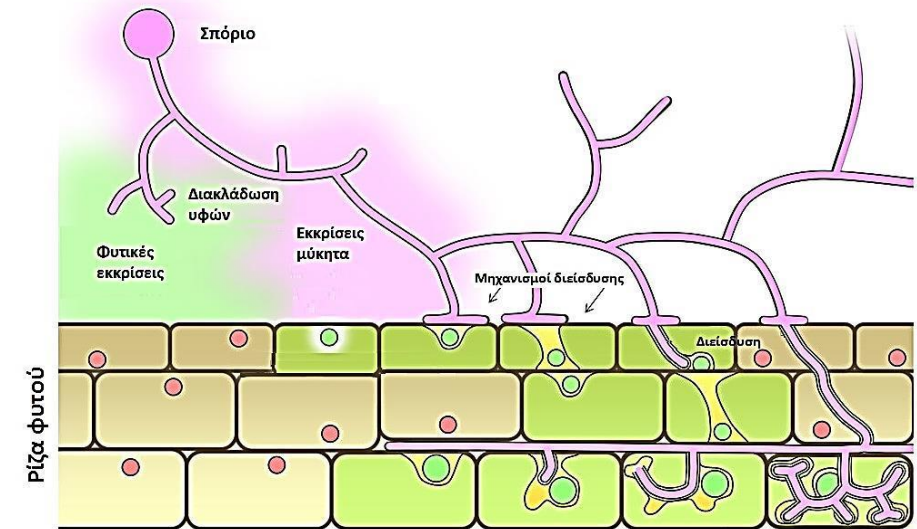
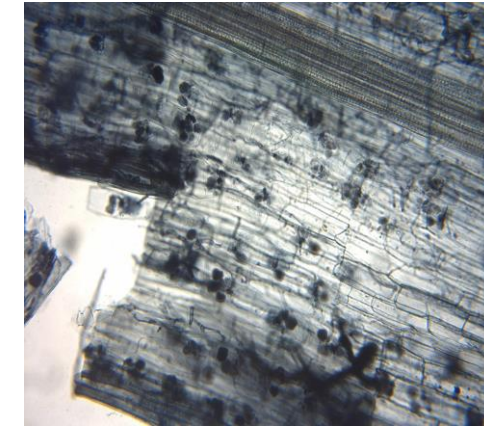
❑ Μυκορριζικοί μύκητες

❑ Η διαδικασία του αποικισμού των ριζών των φυτών από μυκορριζικούς μύκητες βασίζεται σε μοριακούς μηχανισμούς αναγνώρισης μεταξύ του ζεύγους μύκητας-φυτό

❑ Τα φυτά ξενιστές εκκρίνουν ουσίες όπως οι στριγκολακτόνες που δρουν ως φυτορμόνες και διεγείρουν τη μεταβολική δραστηριότητα των μυκήτων και προκαλούν τη βλάστηση υφών από τα σπόρια τους στο έδαφος ώστε να παραχθεί τελικά ένα λεπτό και ευρέως διακλαδισμένο μυκηλιακό δίκτυο υφών εξωτερικά της ρίζας

❑ Οι υφές των μυκήτων με τη σειρά τους εκκρίνουν ουσίες που διαχέονται και σηματοδοτούν μηχανισμούς των φυτών όπως η έκφραση γονιδίων που επάγουν τη συμβίωση

❑ Ακολουθεί ο σχηματισμός απρεσορίων και άλλων μηχανισμών διείσδυσης, προκειμένου ο μύκητας να εισέλθει στη ρίζα δια μέσου της επιδερμίδας.

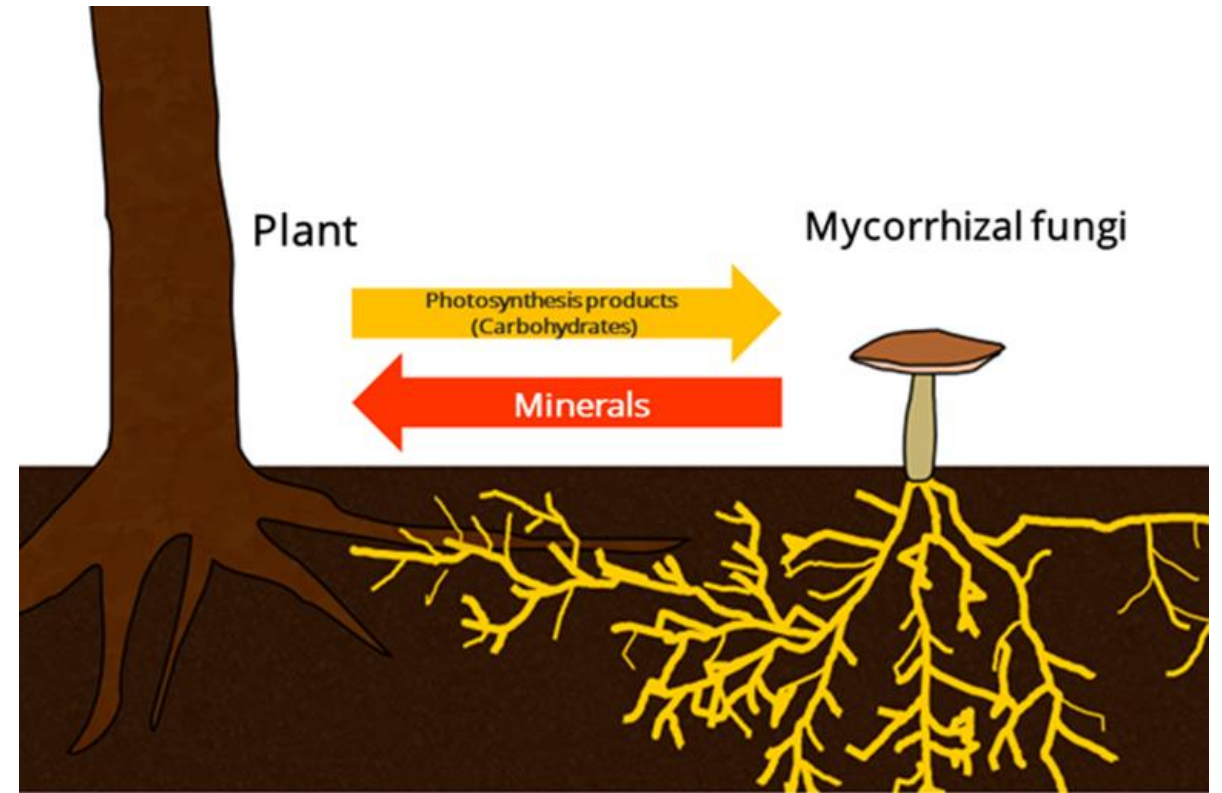


Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί Μύκητες (MM)

❑ Πρόσληψη P

- Το εκτεταμένο δίκτυο υφών των MM βοηθάει σημαντικά τα φυτά στην πρόσληψη ανόργανων θρεπτικών στοιχείων και νερού από το έδαφος
- Όλα τα είδη MM συνεισφέρουν ανόργανο φωσφόρο (P) στους ξενιστές τους **υδρολύοντας τον οργανικό P του εδάφους** με τη δράση των φωσφατασών
- Έμμεσα, οι MM μπορούν να εκμεταλλεύονται τις ποσότητες P που ελευθερώνονται στη ριζόσφαιρα από τη δράση άλλων μικροοργανισμών του εδάφους και να τις μεταφέρουν στο φυτό με το δίκτυο των υφών τους



Το μικροβίωμα των φυτών

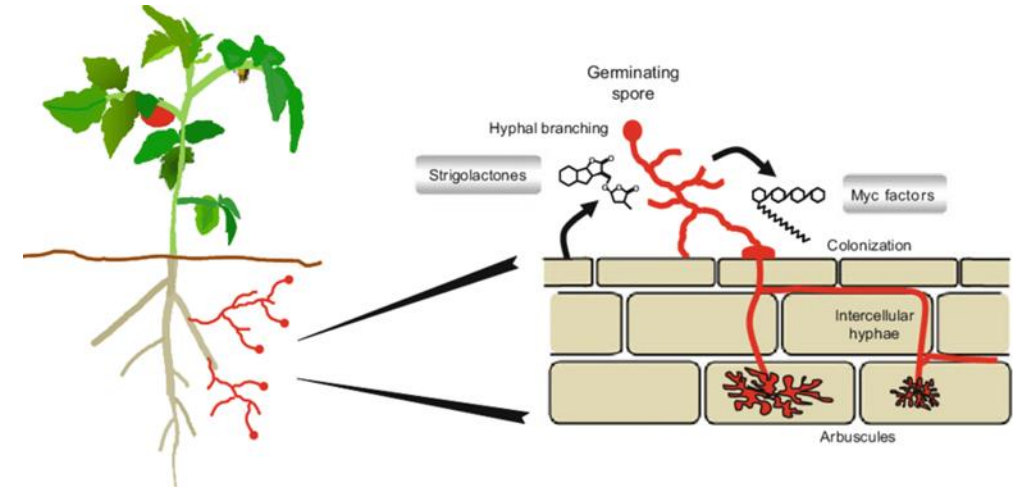
❑ Μυκορριζικοί Μύκητες

❑ Πρόσληψη N και μικροστοιχείων

- Εκτός από τον P, οι MM προσλαμβάνουν και άζωτο (N) από την οργανική ύλη και τα φυτικά υπολείμματα του εδάφους
- Το δίκτυο των υφών του μύκητα μετατρέπει το ανόργανο N σε αμινοξέα και το μεταφέρει κυρίως με τη μορφή αργινίνης, από τις εξωτερικές ριζικές υφές στις εσωτερικές
- Εκτός των P και N, η μυκορριζική συμβίωση συνεισφέρει στα φυτά-ξενιστές και σειρά απαραίτητων μικροστοιχείων όπως Na, Zn, Se, Rb και Sr

❑ Υδατική ισορροπία

- Η συμβίωση των φυτών με MM έχει επίσης βρεθεί ότι βελτιώνει την υδατική τους ισορροπία και ιδιαίτερα σε περιόδους υπερεπάρκειας νερού ή ξηρασίας



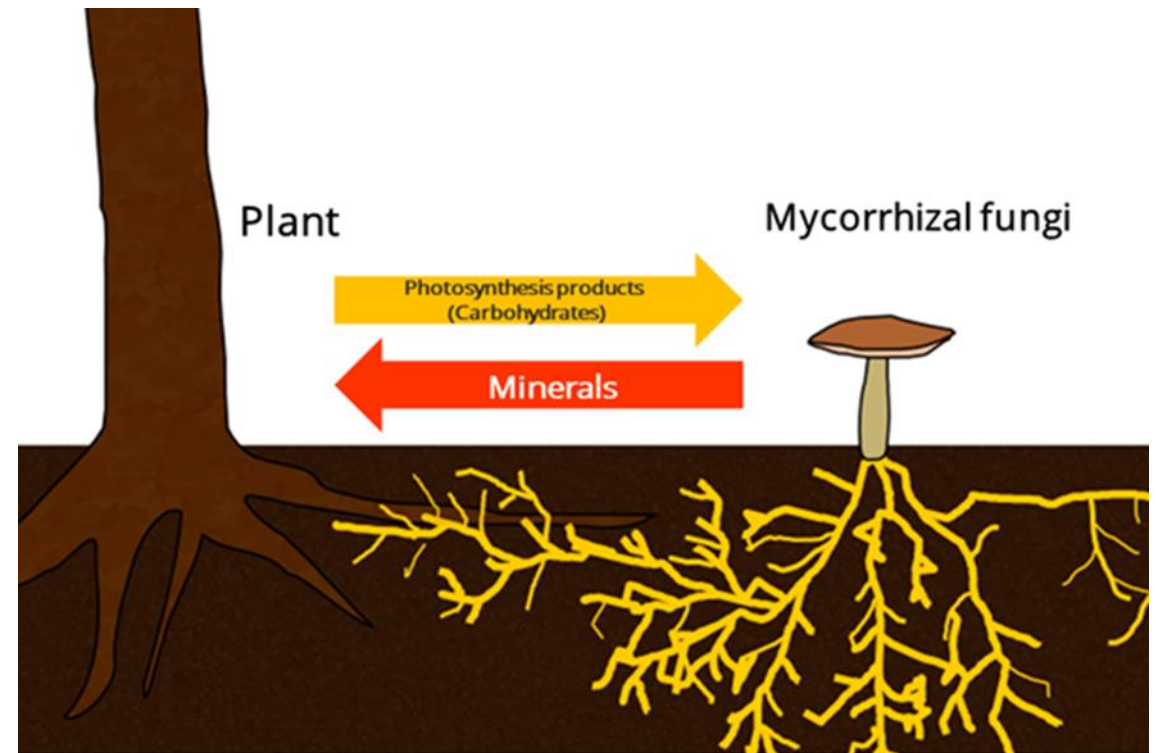
Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί Μύκητες

- Σε αντάλλαγμα το φυτό προμηθεύει τον συμβιωτικό μύκητα με τα **οργανικά προϊόντα της φωτοσύνθεσης** (οργανικός άνθρακας με τη μορφή σακχάρων) που πιστεύεται ότι μεταφέρονται στο ριζικό σύστημα με παθητική διάχυση
- Οι ενδοκυτταρικές υφές και/ή οι δενδρόμορφοι σχηματισμοί προσλαμβάνουν εξόζες, σημαντικό μέρος των οποίων χρησιμοποιούν για τη σύνθεση των λιπιδίων, της τρεχαλόζης και του γλυκογόνου
- Ότι περισεύει μεταφέρεται δια μέσου των υφών του μύκητα στο έδαφος και αφομοιώνεται στην οργανική ύλη του εδάφους

Φυτό-Ξενιστής

Αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης για να καλυφθούν οι ανάγκες του μύκητα



Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί Μύκητες

❑ Δομή – γονιμότητα -υδατοχωρητικότητα

- Δευτερευόντως, οι MM συμμετέχουν στη δημιουργία σταθερών συσσωματωμάτων στο έδαφος με την παραγωγή μιας **υδρόφοβης γλυκοπρωτεΐνης, της γλομαλίνης (glomalin)** που έχει υφή βλεννώδους κόλλας και δρα ως συνδετικός παράγοντας, ενώνοντας τα σωματίδια του εδάφους και σχηματίζοντας σταθερά μακρό-συσσωματώματα
- Η γλομαλίνη, αποτίθεται στα εξωτερικά ριζικά μυκήλια και στα γειτονικά σωματίδια του εδάφους και μπορεί να **διεγείρει την ανάπτυξη βακτηρίων** που με τη σειρά τους συμβάλλουν στη διάσπαση της οργανικής ουσίας του εδάφους.
- Σημαντικό παράγοντα πρόσδεσης των σωματιδίων του εδάφους αποτελεί επίσης το εκτεταμένο δίκτυο υφών των MM που σχηματίζεται εξωτερικά της ρίζας.
- Οι παραπάνω διαδικασίες ασκούν σημαντική επιρροή στη δομή, τη γονιμότητα και την υδατοχωρητικότητα των εδαφών

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί μύκητες

❑ Αποτοξικοποίηση και βιοαποκατάσταση εδαφών

- Ορισμένοι MM, βρέθηκαν να συμμετέχουν σε διαδικασίες αποτοξικοποίησης και βιοαποκατάστασης εδαφών επιβαρυσμένων με βαρέα μέταλλα είτε εμποδίζοντας την πρόσληψη των ουσιών αυτών από ευαίσθητα φυτά ή ενισχύοντας την πρόσληψη τους από τα ανθεκτικά φυτά
- Συμμετοχή των MM στην αυξημένη απομάκρυνση και πρόσληψη από τα φυτά οργανικών ρύπων όπως γεωργικά φάρμακα από το ριζικό σύστημα φυτών

❑ Προστασία από παθογόνα

- Η συμβίωση με MM μπορεί επίσης να παρέχει στα φυτά προστασία έναντι προσβολών από εδαφογενείς φυτοπαθογόνους μύκητες όπως *Fusarium*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Verticillium* κ.α. καθώς και από προσβολές από φυτοπαθογόνους νηματώδεις (π.χ. *Heterodera*, *Meloidogyne*)
- Ως πιθανοί μηχανισμοί αυτής της προστασίας προτείνονται **η καλή θρεπτική κατάσταση των φυτών** που ενισχύει την προσαρμοστική τους ικανότητα (fitness), η αλλαγή της **μορφολογίας του ριζικού συστήματος** δομικά, χωρικά, ποσοτικά και χρονικά, **ο ανταγωνισμός για την κατάληψη χώρου** για αποικισμό και δράση, **ο ανταγωνισμός για τα προϊόντα της φωτοσύνθεσης** που παράγει το φυτό και η **ενεργοποίηση μηχανισμών άμυνας** του φυτού όπως η έκφραση γονιδίων που κωδικοποιούν πρωτεΐνες με αποτέλεσμα την τελική παραγωγή ουσιών με αμυντικό ρόλο όπως οι φυτοαλεξίνες

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί μύκητες

❑ Αλληλεπιδράσεις με άλλους μικροοργανισμούς

- Τέλος, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκαν αλληλεπιδράσεις των MM με άλλους μικροοργανισμούς του εδάφους, όπως ριζοβακτήρια, αζωτοδεσμευτικά βακτήρια, βακτήρια που διαλυτοποιούν τον P, μύκητες του εδάφους ακόμα και άλλους μυκορριζικούς μύκητες
- Οι αλληλεπιδράσεις αυτές μπορεί να είναι συνεργιστικές, ανταγωνιστικές ή ουδέτερες
- Εξαιτίας της ευνοϊκής επίδρασης που ασκούν οι MM στην αύξηση και ανάπτυξη, την φυσιολογία και την προσαρμοστική ικανότητα των φυτών θεωρείται ότι η συμβίωση των φυτών με MM μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των ποσοτήτων των συνθετικών λιπασμάτων και γ.φ. που χρησιμοποιούνται στη γεωργία και συνεπώς να οδηγήσουν σε αντίστοιχη μείωση των αρνητικών συνεπειών που είναι πιθανό να προκληθούν στο περιβάλλον και στην υγεία των καταναλωτών από την αυξημένη χρήση ξενοβιοτικών ουσιών

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μυκορριζικοί μύκητες-Βιοτεχνολογικές εφαρμογές

❑ Περιορισμοί

- Δεν είναι δυνατή η καλλιέργεια τους σε τριβλίο
 - Για διατήρηση πληθυσμών και απομόνωση τους απαιτείται απαραίτητα η παρουσία φυτού και ριζικού συστήματος
 - Πολύ δύσκολη έως αδύνατη η μαζική παραγωγή τους σε βιομηχανική κλίμακα
 - Παραγωγή σποροφύτων «εμβολιασμένων» με μυκόρριζες
- ❑ Πιθανή εφαρμογή των μυκορριζών στην βιολογική γεωργία ή γενικότερα σε συστήματα με μικρές εισροές (γεωργικά φάρμακα, λιπάσματα)
- ❑ Σε εντατικά συστήματα καλλιέργειας (θερμοκηπιακές καλλιέργειες) το φυτό δεν χρειάζεται τις μυκόρριζες για να παραλάβει φώσφορο από το έδαφος καθώς του παρέχεται άμεσα με την χρήση συνθετικών φωσφορικών λιπασμάτων

Το μικροβίωμα των φυτών

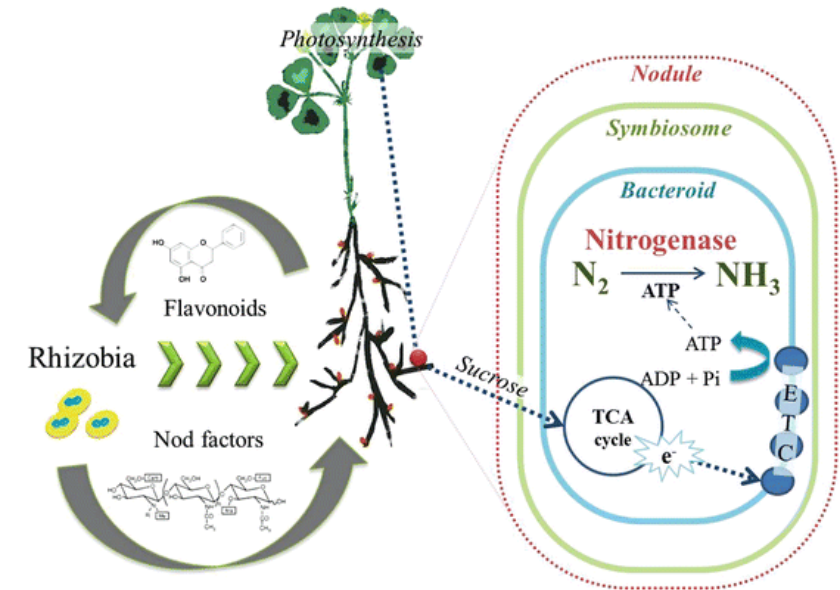
□ Συμβιωτικά αζωτοδεσμευτικά βακτήρια

□ Επιλεγμένες ομάδες φυτών έχουν εξελίξει στενές συμβιωτικές σχέσεις με **αζωτοδεσμευτικά βακτήρια** που φιλοξενούνται σε ειδικά όργανα, που καλούνται **φυμάτια** (nodules) και που απαντώνται στις ρίζες αυτών των φυτών

➤ **Αμοιβαία αναγνώριση διαμέσου μοριακής σηματοδότησης και σχηματισμός των φυματίων**

□ Τα **ψυχανθή φυτά** και τα είδη του γένους *Parasponia* (*Cannabaceae*, Αγγειόσπερμα) σχετίζονται με αζωτοδεσμευτικά **ριζόβια** (*Bosea*, *Aminobacter*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium*, *Pararhizobium* κ.α.) ενώ τα ακτινορριζικά φυτά σχετίζονται με αζωτοδεσμευτικά βακτήρια του γένους **Frankia**

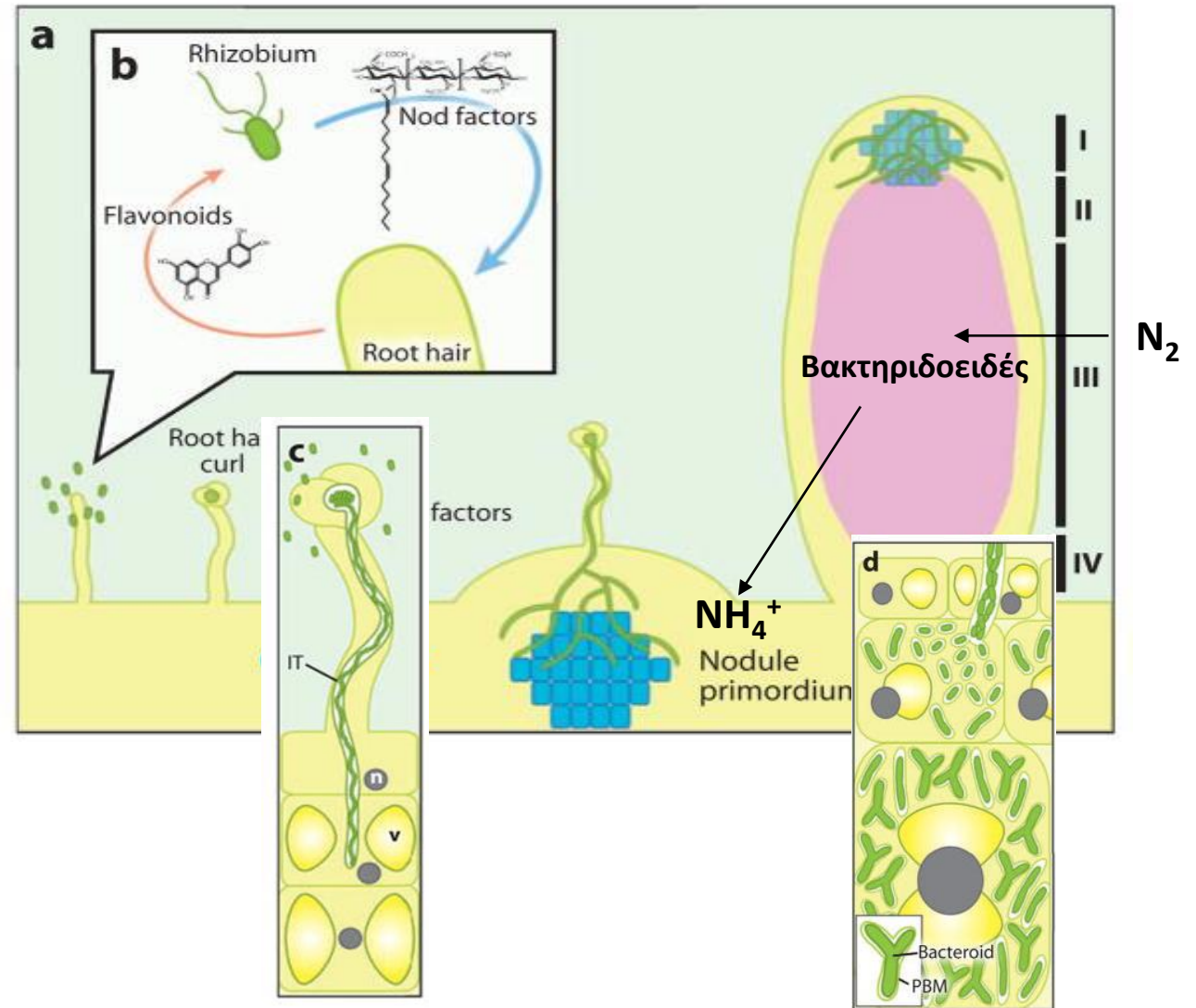
□ Τα αζωτοδεσμευτικά βακτήρια μετατρέπουν το αέριο στοιχειακό άζωτο (N_2) σε αμμωνία, νιτρικά και άλλες αζωτούχες ενώσεις που ενισχύουν το μεταβολισμό του φυτού. Το φυτό σε αντάλλαγμα προσφέρει στα αζωτοδεσμευτικά βακτήρια τα προϊόντα της φωτοσύνθεσης



Μηχανισμός Αζωτοδέσμευσης

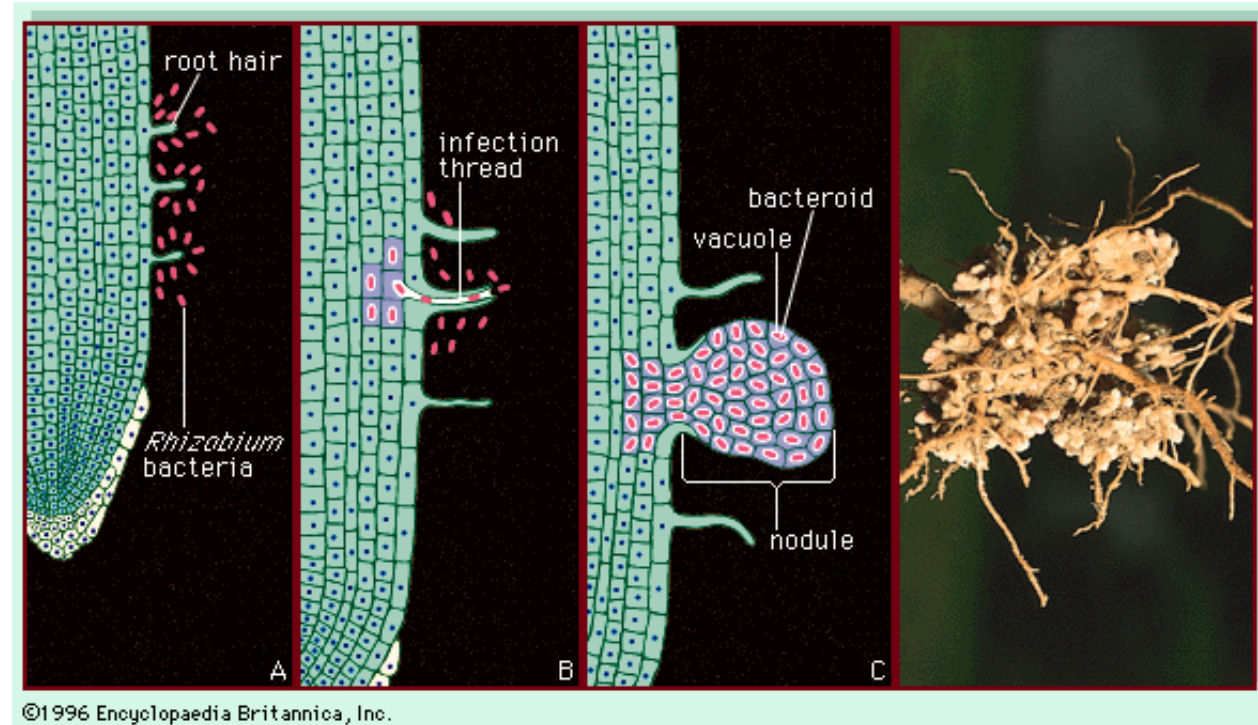
□ Οργανογένεση φυματίου

1. Η ρίζα εκκρίνει φλαβονοειδή που ελκύουν τα ριζόβια
2. Τα ριζόβια παράγουν του παράγοντες Nod (από τα nod γονιδια), και έτσι αναγνωρίζονται ως κατάλληλοι συμβιώτες
3. Ο παράγοντας Nod επάγει διάφορες αντιδράσεις του ξενιστή όπως: συστρόφη ριζικού τριχιδίου, δημιουργία νηματίου μόλυνσης, κυτταρικές διαιρέσεις στη ρίζα
4. Το φυτό δημιουργεί ένα νέο όργανο, το φυμάτιο



Μηχανισμός Αζωτοδέσμευσης

- ❑ **Γονίδια *nod*:** Ελέγχουν την έκκριση ουσιών απαραίτητων για την αναγνώριση του φυτού ξενιστή, την έναρξη προσβολής και την δημιουργία φυματίων
- ❑ **Γονίδια *nif* και *fix*:** Τα γονίδια *nif* εκφράζονται στο εσωτερικό των φυματίων και ελέγχουν την παραγωγή της νιτρογενάσης ενώ τα γονίδια *fix* ελέγχουν τη μεταφορά ηλεκτρονίων στην νιτρογενάση



Βιοτεχνολογικές εφαρμογές

1. Ενσωμάτωση **nif** γονιδίων σε ριζοβακτήρια όπως βακτήρια του γένους *Pseudomonas* -> Πρόβλημα η πιθανότητα ανάπτυξης συμβιωτικού μηχανισμού με ζιζάνια και όχι με καλλιεργούμενο φυτό
2. Ενσωμάτωση των γονιδίων **nif** σε άλλα καλλιεργούμενα φυτά ή των υποδοχέων των Nod παραγόντων, όπως τα σιτηρά => αποτελεί εδώ και χρόνια στόχο ερευνητών χωρίς επιτυχία

□ Εμπορικά σκευάσματα *Rhizobium* => βιολογικά λιπάσματα

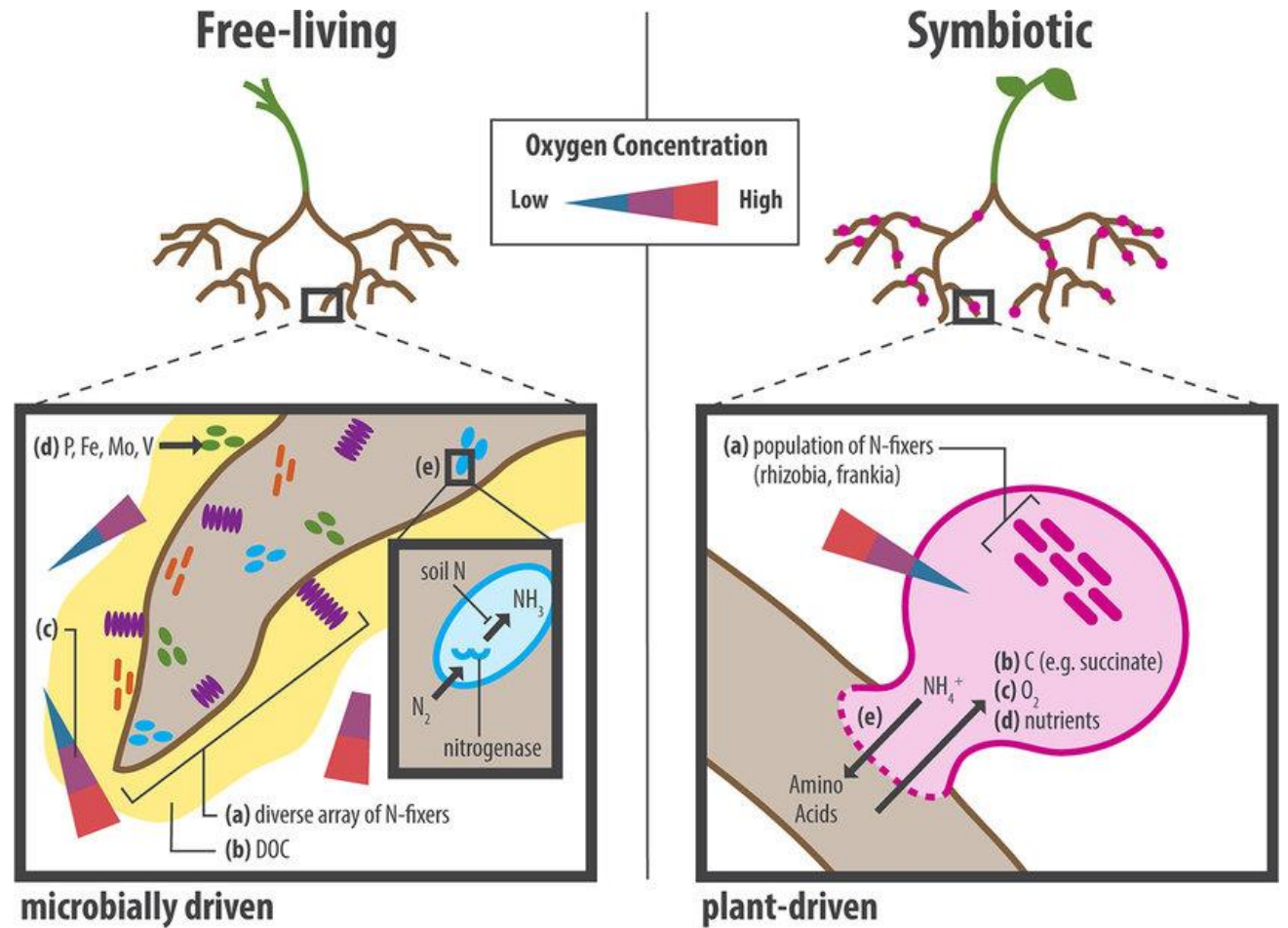
- **Soil Implant**®: σκεύασμα με φορέα τύρφη
- **Gold Coat**™: σκεύασμα με φορέα βερμικουλίτη
- **Cell -Tech**®: υγρό σκεύασμα επικάλυψης σπόρων σόγιας
- **Nitragin Gold**®: σκεύασμα ξηρής αργιλικής σκόνης

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Μη συμβιωτικά αζωτοδεσμευτικά βακτήρια

❑ Τα μη συμβιωτικά αζωτοδεσμευτικά βακτήρια της ριζόσφαιρας ανήκουν στα γένη *Azoarcus*, *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Diazotrophicus*, *Enterobacter*, *Gluconacetobacter*, *Pseudomonas* και σε γένη Κυανοβακτηρίων όπως *Anabaena*, *Nostoc*

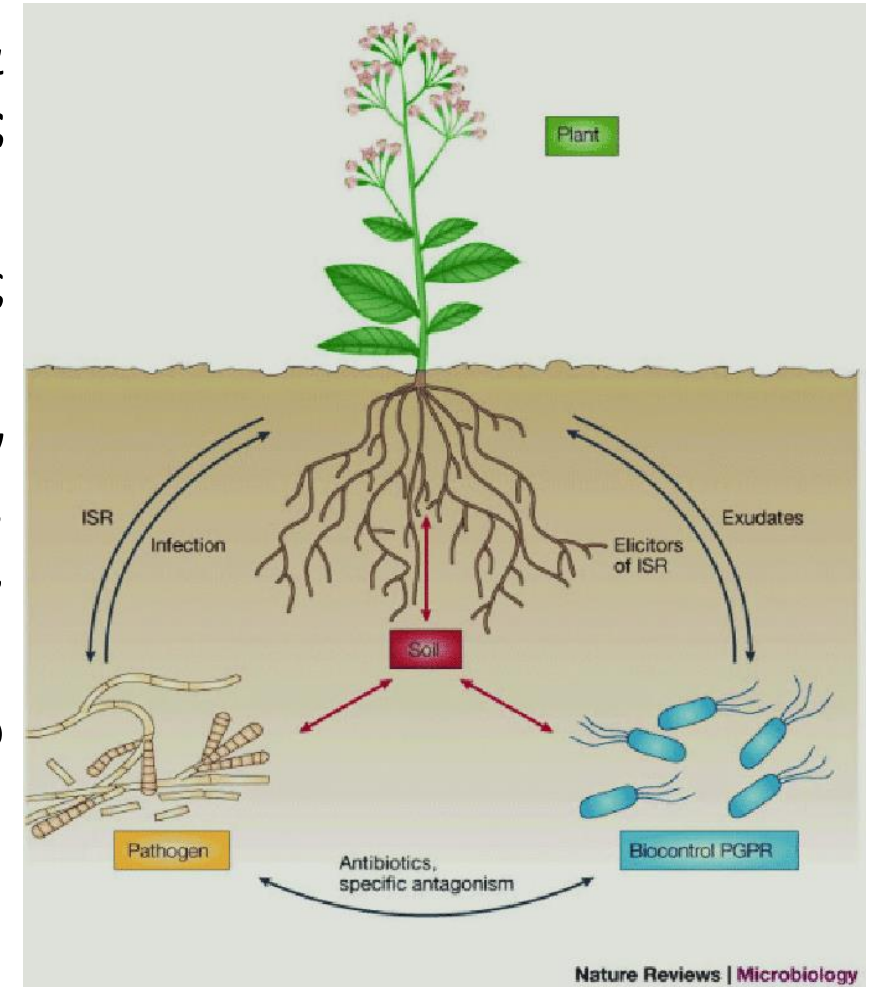
❑ Η μη συμβιωτική αζωτοδέσμευση υποστηρίζεται από τον διαλυτό οργανικό άνθρακα (DOC), το οξυγόνο που παράγεται από την αναπνοή των μικροοργανισμών και των ριζών, και θρεπτικά όπως P, Fe, Mo, and V που προμηθεύονται από μόνα τους τα μη αζωτοδεσμευτικά βακτήρια



Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))

- ❑ Τα PGPB είναι μια ομάδα βακτηρίων που έχουν τη δυνατότητα να αποικίζουν ενεργά το ριζικό σύστημα των φυτών ενισχύοντας την αύξηση και αποδοτικότητα των φυτών
- ❑ Αντιπροσωπεύουν το 2 to 5% του συνόλου των βακτηρίων της ριζόσφαιρας
- ❑ Ένα ευρύ φάσμα από ελεύθερα διαβιούντα ή συμβιωτικά των φυτών βακτήρια των γενών *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Burkholderia*, *Bacillus* και *Serratia* αποτελούν PGPB
- ❑ Τα PGPB ενισχύουν την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών μέσω διαφορετικών μηχανισμών



Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))

❑ Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των PGPB με τα φυτά:

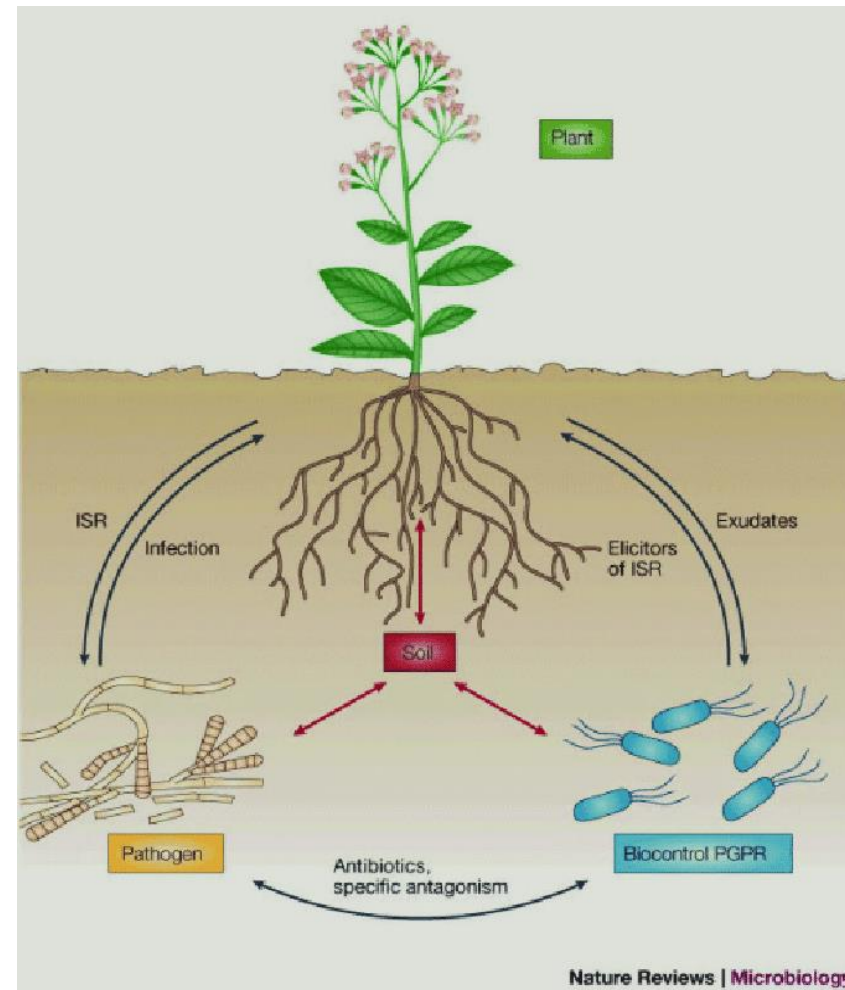
❑ Άμεση αλληλεπίδραση

- Αύξηση της πρόσληψης θρεπτικών
- Ρύθμιση των επιπέδων των ορμονών των φυτών
- Αύξηση της επιφάνειας του ριζικού συστήματος

❑ Έμμεση αλληλεπίδραση

- Μειωση της παρεμποδιστικής δράσης διαφόρων παθογόνων στην αύξηση των φυτών
- Ανάπτυξη παραγόντων βιοελέγχου

❑ Βιοαπορύπανση του περιβάλλοντος μέσω αποδόμησης τοξικών ρύπων όπως βαρέα μέταλλα και γεωργικά φάρμακα



Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))

❑ Δράση των PGPB ως βιολίπασμα

- Αζωτοδέσμευση
- Διαλυτοποίηση και ανοργανοποίηση φωσφόρου
- Διαλυτοποίηση K και Zn
- Παραγωγή σιδηροφόρων
- Παραγωγή εξωκυτταρικών πολυσακχαριτών

❑ Δράση των PGPB ως βιολογικά γεωργικά φάρμακα

- Παραγωγή αντιβιοτικών ουσιών, λυτικών ενζύμων, πτητικών ουσιών με παρεμποδιστική δράση για τα παθογόνα και διασυστηματική επαγωγή συστημάτων αντοχής-ανθεκτικότητας
- Ανταγωνισμός για σίδηρο, θρεπτικά και χώρο
- Παραγωγή σιδηροφόρων

❑ Δράση των PGPB ως παράγοντες αύξησης (phytostimulators)

- **Παραγωγή φυτοορμονών** όπως οι αυξίνη, κυτοκίνη, γιβεριλλίνη και ινδολιλοξικό οξύ (IAA) που επηρεάζουν την αύξηση του φυτού διαμορφώνοντας τα επίπεδα των ενδογενών ορμονών σε σχέση με το φυτό
- **Έκκριση του ενζύμου 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) απαμινάση**, που μειώνει τα επίπεδα της ορμόνης του αιθυλενίου (ορμόνη στρες) π.χ. *Pseudomonas* spp., *Arthrobacter* spp. και *Bacillus* spp.

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))

❑ Δέσμευση και παροχή στοιχειακού N₂ στα φυτά

- Πολλά ριζοβακτήρια κατέχουν το ένζυμο νιτρογενάση που είναι υπεύθυνο για την δέσμευση του στοιχειακού N₂ από την ατμόσφαιρα. Ωστόσο, μέχρι τώρα δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που να αποδεικνύουν ότι παρέχουν N₂ σε καλλιεργούμενα φυτά χωρίς την ανάπτυξη συμβίωσης

Azoarcus

Beijerinckia sp.

Klebsiella pneumoniae

Pantoea agglomerans

Rhizobium sp.

Βακτήρια που έχουν συνδεθεί με την παροχή αζώτου σε φυτά χωρίς όμως σημαντικές αποδείξεις ότι πραγματικά προωθούν την καλύτερη θρέψη των φυτών

Τα περισσότερα PGPR που έχουν απομονωθεί ως σήμερα είναι και αζωτοδεσμευτικά

Το μικροβίωμα των φυτών

□ Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))

- Διαλυτοποίηση P στο έδαφος
- Ο P είναι το δεύτερο σε συχνότητα στοιχείο μετά το N που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των φυτών
- Ο P βρίσκεται σε αφθονία στο έδαφος αλλά κυρίως σε **αδιάλυτες ανόργανες** (οξειδία, υδροξείδια Fe, Al) ή **οργανικές μορφές** (φυτικό οξύ)
- Τα φυτά μπορούν να προσλάβουν P από το έδαφος μόνο σε δύο μορφές: H_2PO_4^- (μονοβασική) και HPO_4^{2-} (διβασική)

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))

❑ Διαλυτοποίηση ανόργανου P στο έδαφος

- Τα βακτήρια μετατρέπουν μη διαθέσιμες μορφές ανόργανου P σε διαθέσιμες μορφές παράγοντας οξέα όπως, γλυκονικό, 2-κετογλυκονικό οξύ, οξαλικό, μαλονικό και ηλεκτρικό οξύ που προκαλούν οξίνιση του βακτηριακού μικρο-περιβάλλοντος και διαλυτοποίηση των οξειδίων Fe, Al που περιέχουν P

❑ Διαλυτοποίηση οργανικού P στο έδαφος

- Τα βακτήρια μετατρέπουν οργανικές μορφές P (**νουκλεϊκά οξέα, φωσφολιπίδια, σάκχαρα, φυτικό οξύ, πολυφωσφορικά και φωσφονικά**) σε διαθέσιμες μορφές με την βοήθεια **φωσφατασών** (υδρολυτικά ένζυμα που διασπούν φωσφοεστερικούς δεσμούς)
- **Όξινες φωσφοεστεράσες**
- **Αλκαλικές φωσφοεστεράσες**

Το μικροβίωμα των φυτών

- ❑ **Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))**
 - ❑ Αύξηση της επιφάνειας του ριζικού συστήματος
 - ❑ Σημαντικός αριθμός βακτηρίων έχει βρεθεί ότι ενεργοποιούν την αύξηση του όγκου της ρίζας και μεταβάλλουν της μορφολογίας της με σκοπό την αυξημένη πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος
 - Παράδειγμα: Το *Azospirillum brasilense* προκάλεσε 63% αύξηση του ξηρού βάρους του ριζικού συστήματος φυτών σόγιας και 10 φορές αύξηση στο συνολικό μήκος των ριζών
 - ❑ Μεγάλος αριθμός PGPR παράγουν **ινδολιλοξικό οξύ (IAA)**, που αποτελεί την ενδογενή αυξίνη των φυτών και έχει βρεθεί ότι είναι υπεύθυνη για την διαφοροποίηση των ριζών, κυτταρική διαίρεση και αύξηση
 - ❑ Τα PGPB που παράγουν IAA προκαλούν αύξηση της συνολικής επιφάνειας των ριζών και κατά συνέπεια αύξηση της πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά

Το μικροβίωμα των φυτών

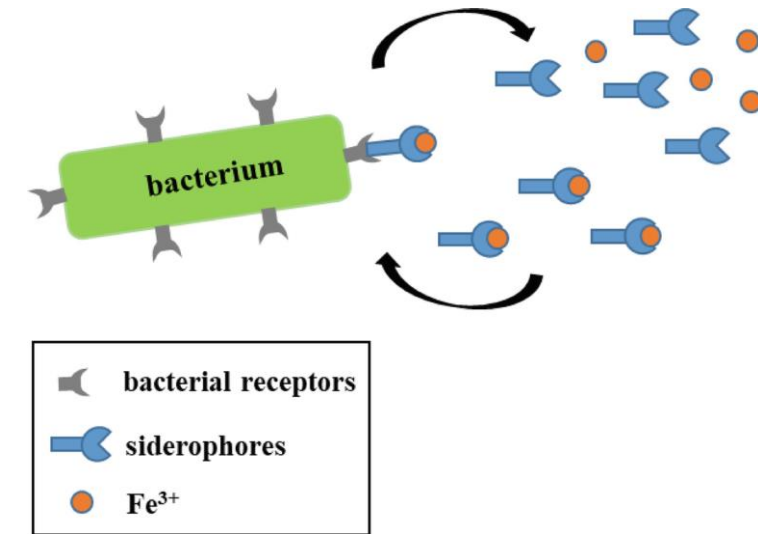
❑ Πρόσληψη σιδήρου- Σιδηροφόροι

- ❑ Ο ρόλος των ενδοφυτικών μικροοργανισμών στην πρόσληψη σιδήρου σχετίζεται με την παραγωγή **σιδηροφόρων**
- ❑ Υπάρχουν περισσότεροι από 500 διαφορετικοί τύποι σιδηροφόρων που παράγονται από μικροοργανισμούς
- ❑ Οι σιδηροφόροι που παράγονται από τους μικροοργανισμούς βελτιώνουν άμεσα τη διαθεσιμότητα του σιδήρου στους ίδιους τους μικροοργανισμούς και στα φυτά με άμεση συμπλοκοποίηση του Fe από το έδαφος
- ❑ Μπορούν ωστόσο επίσης να συνεισφέρουν στην αύξηση της διαθεσιμότητας του Fe διαμέσου ανταγωνισμού για το Fe με άλλους μικροοργανισμούς και παθογόνα



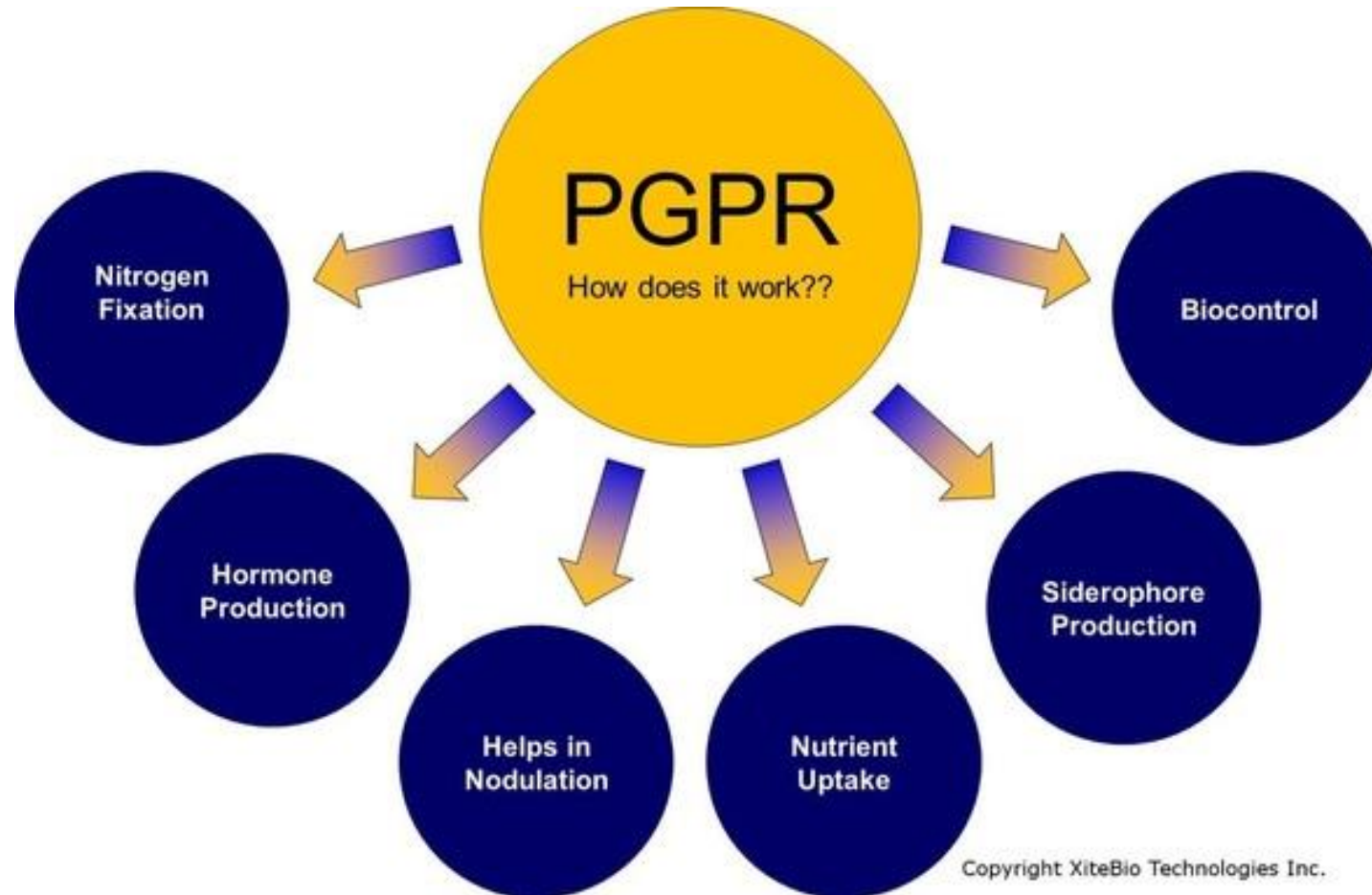
Άμεσο ρόλο στην αύξηση και προσαρμοστική ικανότητα των φυτών

Ο Fe στο έδαφος βρίσκεται υπό την μορφή Fe^{2+} (προτιμάται από τα φυτά) και Fe^{3+} που επικρατεί σε καλά αεριζόμενα εδάφη αλλά μπορεί να καταστεί μη διαθέσιμος σχηματίζοντας οξείδια



Το μικροβίωμα των φυτών

- Βακτήρια ενίσχυσης της φυτικής ανάπτυξης (plant growth-promoting bacteria(PGPB))



Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Αλληλεπίδραση φυτού-ξενιστή και μικροβιώματος

❑ Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ φυτού και μικροβιώματος είναι περίπλοκες και δυναμικές

▪ Παραγωγή φυτικών ορμονών

✓ indole-3-acetic acid (IAA) και ριζόβια

✓ γιβεριλλίνες και *Bacillus* spp.

✓ *Pseudomonas syringae* και ομόλογα ορμονών που παρεμβαίνουν στη σηματοδότηση (signaling) του γιασμονικού οξέος και του αιθυλενίου προκαλώντας το άνοιγμα των στομάτων και την είσοδο του παθογόνου

▪ Αποδόμηση ορμονών

▪ Παραγωγή ουσιών πρόδρομων των ορμονών

✓ Η μικροβιακή απαμίνωση του 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) αποτρέπει την παραγωγή αιθυλενίου και προσδίδει στα φυτά αντοχή σε συνθήκες περιβαλλοντικού στρες

Το μικροβίωμα των φυτών

❑ Αλληλεπίδραση φυτού-ξενιστή και μικροβιώματος

❑ Κάποια χημικά σήματα που παράγονται από τα φυτά διευκολύνουν συγκεκριμένες αλληλεπιδράσεις, ενώ πολλά από αυτά αναγνωρίζονται και από άλλους οργανισμούς

▪ Τα φλαβονοειδή σηματοδοτούν διάφορες αντιδράσεις σε ριζόβια, μυκόρριζες, παθογόνα των ριζών και σε άλλα φυτά

▪ Οι στριγκολακτόνες επάγουν τη διακλάδωση των υφών στους μυκορριζικούς μύκητες και προωθούν τη βλάστηση σπορίων παρασιτικών φυτών

❑ Τα φυτά παράγουν ποικιλία αντιμικροβιακών ουσιών είτε φυσιολογικά είτε ως αντίδραση στα παθογόνα

▪ Φαινόλες, τερπενοειδή και αλκαλοειδή: ευρέως διαδεδομένα στο φυτικό βασίλειο

▪ Γλυκοσινολικά: παράγονται μόνο από μέλη της τάξης Brassicales, π.χ. *Arabidopsis*

▪ Βρώμη (*Avena strigosa*) και τριτερπενοειδείς σαπωνίνες (avenacins) με δράση κατά των μυκήτων

Παράγοντες που επηρεάζουν το μικροβίωμα των φυτών

❑ Η μικροβιακή σύνθεση σε κάθε φυτικό όργανο επηρεάζεται από πλήθος βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων

❑ **Παράγοντες που σχετίζονται με το υπόγειο τμήμα του φυτού**

- pH του εδάφους
- αλατότητα
- τύπος του εδάφους
- δομή του εδάφους
- υγρασία του εδάφους
- οργανική ύλη του εδάφους

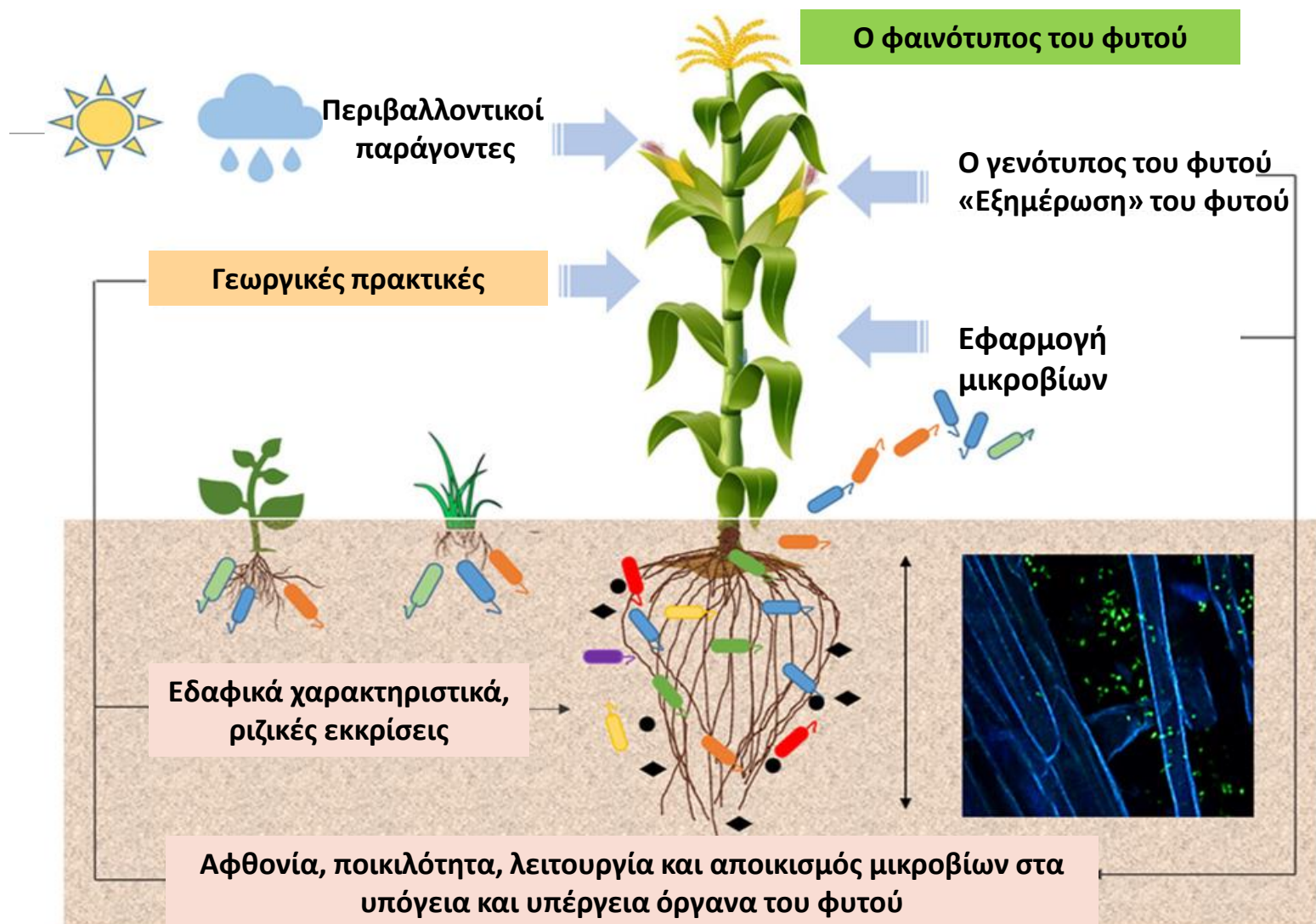
Παράγοντες που επηρεάζουν το μικροβίωμα των φυτών

❑ Παράγοντες που σχετίζονται με το υπόγειο και υπέργειο τμήμα του φυτού

- Εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως κλίμα, παρουσία παθογόνων, καλλιεργητικές πρακτικές
 - Το είδος του φυτού και ο γενότυπος προσελκύουν μικροοργανισμούς από το εδαφικό περιβάλλον όπου η μορφολογία της ρίζας και το είδος των ριζικών απεκκρίσεων επηρεάζουν το ποιοι από αυτούς θα αποτελέσουν το μικροβίωμα του φυτού => είδη φυτών που αναπτύσσονται στο ίδιο έδαφος συστρατεύουν διαφορετικές μικροβιακές κοινότητες στη ριζόσφαιρά και στα επιμέρους τμήματα της ρίζας
- ❑ Σε πρόσφατες μελέτες βρέθηκε πως το εγγενές **ανοσοποιητικό σύστημα του ξενιστή και οι ριζικοί μεταβολίτες** μπορούν να διαμορφώσουν τη δομή του μικροβιώματος
- ❑ Άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με τον ξενιστή όπως η ηλικία του φυτού, το στάδιο ανάπτυξης, η κατάσταση της υγείας, ο βαθμός προσαρμοστικότητας επηρεάζουν επίσης τη δομή του μικροβιώματος των φυτών **επιδρώντας στο σύστημα σηματοδότησης διαφόρων μονοπατιών** όπως επαγωγή διασυστηματικής ανθεκτικότητας-αντοχής, και στη σύνθεση των ριζικών εκκρίσεων

Αξιοποίηση και τροποποίηση του μικροβιώματος των φυτών

- Η παρουσία των μικροοργανισμών είναι σημαντική για την αύξηση του φυτού και την προστασία του από εχθρούς και στρεσογόνες καταστάσεις
- Ο εμβολιασμός των φυτών με ειδικούς μικροοργανισμούς μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των φυτών
- Για το σκοπό αυτό απαιτείται κατευθυνόμενη επιλογή και μεταφορά μικροβιακών στελεχών ή μικροβιακών κοινοπραξιών
- Ενίσχυση του μικροβιώματος μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλες γεωργικές πρακτικές
- Γενετική βελτίωση των φυτών για βέλτιστη αλληλεπίδραση με τους μικροοργανισμούς θα βοηθούσε προς αυτή την κατεύθυνση



Αξιοποίηση και τροποποίηση του μικροβιώματος των φυτών

□ Τροποποίηση (Engineering) του μικροβιώματος των φυτών

□ Η τροποποίηση του μικροβιώματος της ριζόσφαιρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταβολή της σύστασης του μικροβιακού δικτύου με σκοπό τη βελτίωση του φαινοτύπου των φυτών => αύξηση, προσαρμοστική ικανότητα και υγεία του φυτού

□ Για την τροποποίηση μικροβιωμάτων της ριζόσφαιρας έχουν χρησιμοποιηθεί:

□ Μεταφορά –εφαρμογή μικροοργανισμών

□ Συνθετικά μικροβιώματα

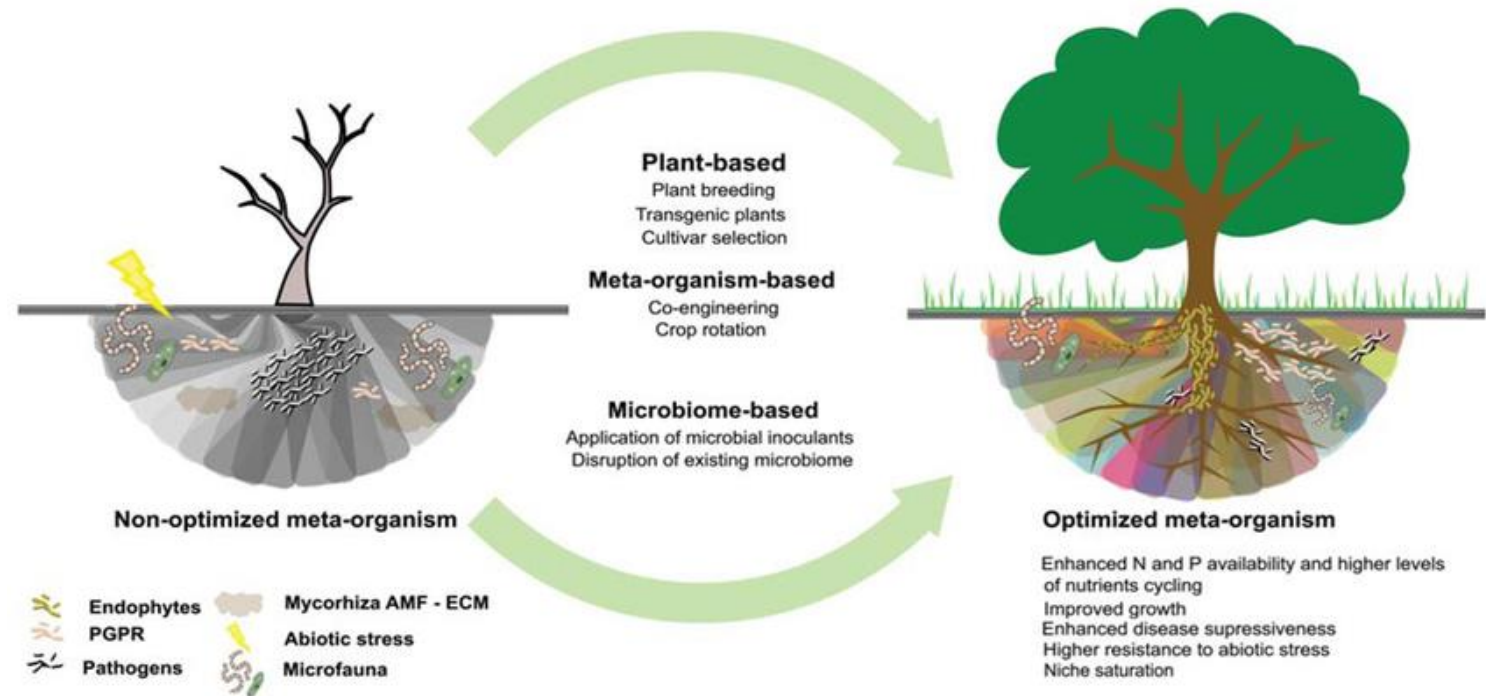
□ Τεχνητή επιλογή προκαλούμενη από το φυτό ξενιστή

▪ Διασταύρωση φυτών- επιλογή ποικιλιών

▪ Γενετική τροποποίηση

▪ Συντροποποίηση φυτών και μικροοργανισμών

▪ Εναλλαγή καλλιεργειών



Αξιοποίηση και τροποποίηση του μικροβιώματος των φυτών

□ Τροποποίηση (Engineering) του μικροβιώματος των φυτών

□ Η τροποποίηση του μικροβιώματος της ριζόσφαιρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταβολή της σύστασης του μικροβιακού δικτύου με σκοπό τη βελτίωση του φαινοτύπου των φυτών => αύξηση, προσαρμοστική ικανότητα και υγεία του φυτού

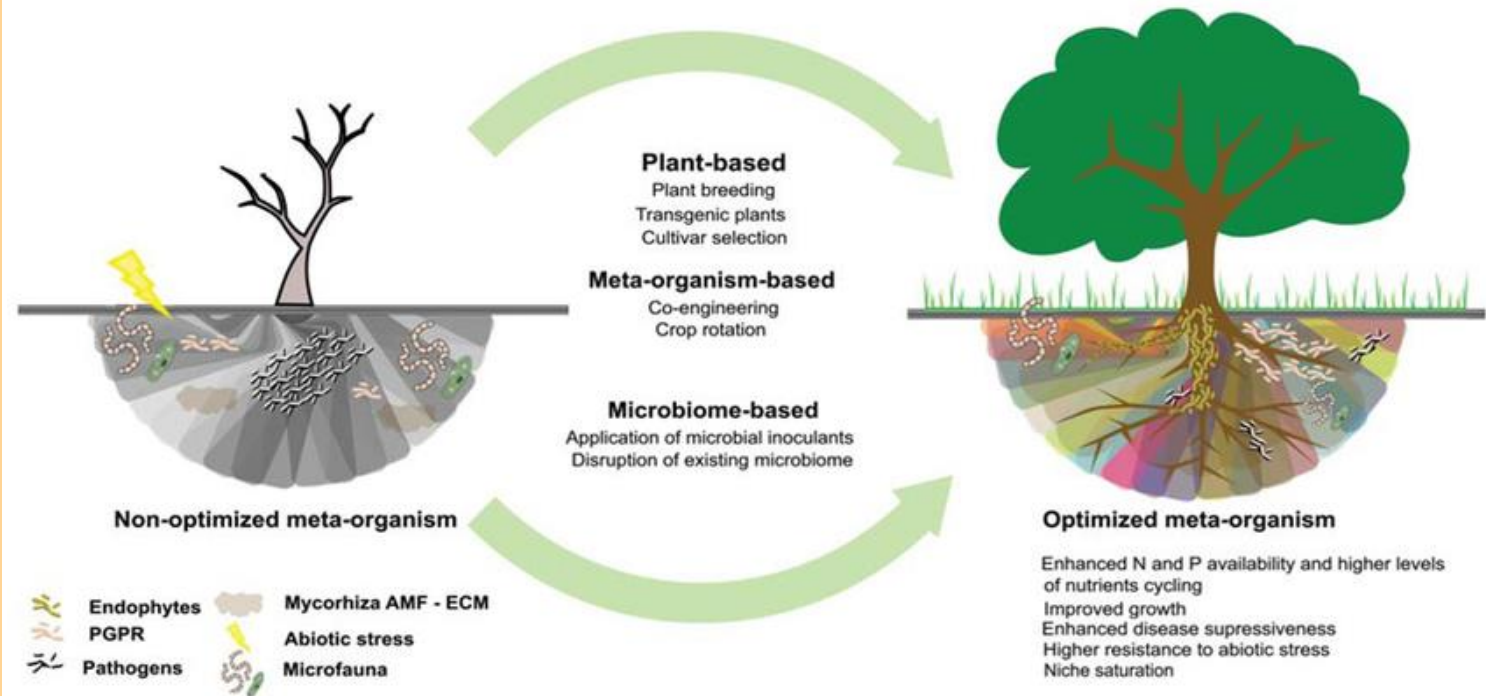
□ Εφαρμογή μικροβιακών εμβολίων (βιολιπάσματα)

- ριζοβακτήρια που ενισχύουν τη φυτική ανάπτυξη (PGPR), αζωτοδεσμευτικά ριζόβια, μυκορριζικοί μύκητες

- στελέχη ανασυνδιασμού και οριζόντια μεταφορά γονιδίων

- Διατάραξη των μικροβιακών κοινοτήτων για τη διευκόλυνση της εισαγωγής των ωφέλιμων μικροοργανισμών

- Μηχανική ή χημική διατάραξη: όργωμα, μυκητοκτόνα, αντιβιοτικά



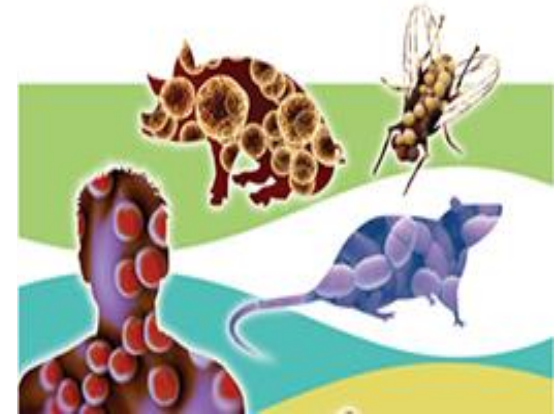
Αξιοποίηση και τροποποίηση του μικροβιώματος των φυτών

- ❑ Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για την πιθανή **αποτυχία των μικροβιακών εμβολίων** στον αγρό
- **Ανταγωνισμός:** Οι μικροοργανισμοί στο φυσικό περιβάλλον χαρακτηρίζονται από υψηλή ποικιλότητα και υψηλή προσαρμοστικότητα έτσι ώστε ο νέος μικροοργανισμός που εισάγεται να μην είναι αρκετά ανταγωνιστικός
- Η «**δόση εφαρμογής**» = αριθμός κυττάρων που θα εφαρμοστούν και η φυσιολογική τους δραστηριότητα θα επηρεάσουν την ανταγωνιστική ικανότητα του εμβολίου
- **Χρήση κατάλληλων σκευασμάτων- τυποποίηση**
- **Εξειδίκευση ως προς το είδος – γενότυπο –ιστό φυτού:** Αν το στέλεχος έχει σχεδιαστεί για να αποικίζει τα αντίστοιχα φυτικά είδη – γενότυπους-ιστούς, και αν είναι ικανό να επιτελέσει την επιθυμητή λειτουργία στο περιβάλλον εισαγωγής

Το μικροβίωμα των ζώων

- ❑ Το **μικροβίωμα του ανθρώπου** είναι σύνθετο και χαρακτηρίζεται από υψηλή ποικιλότητα
- ❑ Ο αριθμός των μικροοργανισμών που φιλοξενεί το ανθρώπινο σώμα θεωρείται ότι είναι **10 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των ανθρώπινων κυττάρων** ενώ το ολογονιδίωμα φαίνεται να περιέχει περίπου 100 φορές περισσότερα γονίδια από το γονιδίωμα του ξενιστή
- ❑ Το μικροβίωμα παίζει σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη υγεία και μεταβολές στη σύνθεση του ανθρώπινου μικροβιώματος έχουν συσχετιστεί με παθήσεις όπως ο διαβήτης, η παχυσαρκία, το άσθμα, η ρευματοειδής αρθρίτιδα κ.α. αλλά και με γενικευμένη ευαισθησία σε μολύνσεις

- ❑ Τα τελευταία χρόνια το **μικροβίωμα** ενός αριθμού σπονδυλωτών **ζώων οικόσιτων και άγριων**, όπως ο δαίμονας της Τασμανίας, το κόκκινο πάντα, το κοάλα κ.α. έχει αλληλουχηθεί

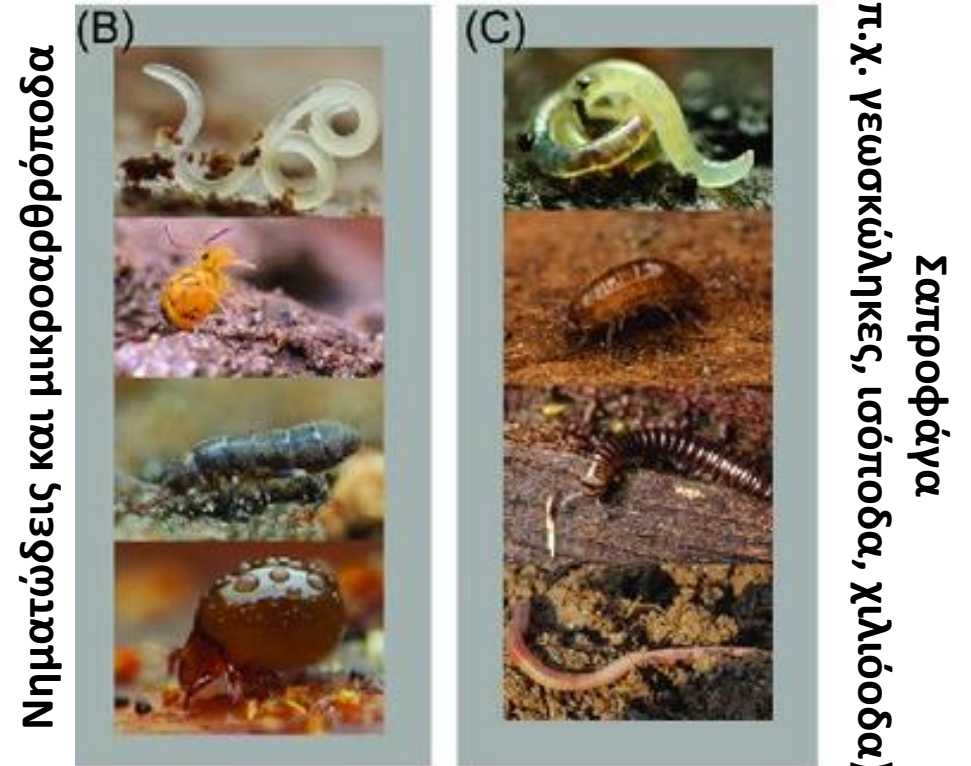


- ❑ Τα **έντομα** αποτελούν την πιο ποικιλόμορφη και άφθονη ομάδα ζώων στη γη με δυνατότητα αποικισμού σε πολλά και διακριτά ενδιαίτηματα
- ❑ Τα διάφορα είδη των εντόμων φιλοξενούν μεγάλο αριθμό διακριτών μικροβιακών κοινοτήτων με επικουρικό ρόλο στη βιολογία των εντόμων
- ❑ Μεγαλύτερη προσοχή έχει κερδίσει το **μικροβίωμα του εντερικού συστήματος των εντόμων**

Το μικροβίωμα των ζώων

□ Ασπόνδυλα

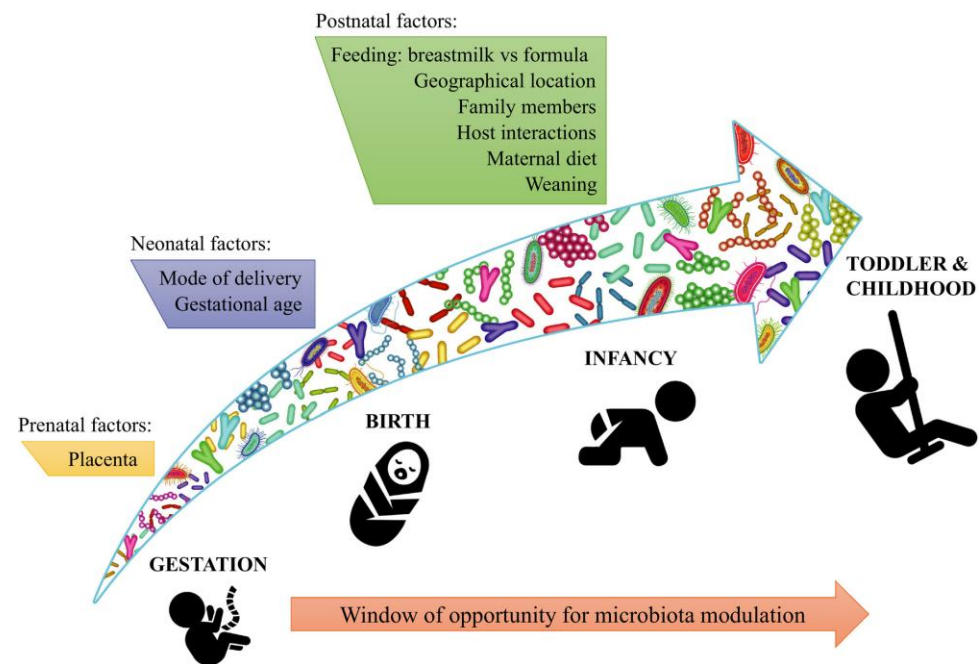
- Το μικροβίωμα των ασπόνδυλων χερσαίων ζώων έχει κερδίζει την προσοχή, κυρίως το μικροβίωμα του εντέρου ορισμένων **εντόμων του εδάφους**, αλλά και ορισμένων άλλων ομάδων όπως **κολλέμβολα, γεωσκώληκες και νηματώδεις**
- Μικροβίωμα που διαφέρει ανάλογα με τις διατροφικές συνήθειες
- **Οικολογικός ρόλος στη διάσπαση ανθεκτικών βιολογικών οργανικών ενώσεων** όπως η χιτίνη και η λιγνοκυτταρίνη => πέψη της τροφής και οικολογική σημασία στον κύκλο του άνθρακα



Το μικροβίωμα των ζώων

❑ Το μικροβίωμα των θηλαστικών

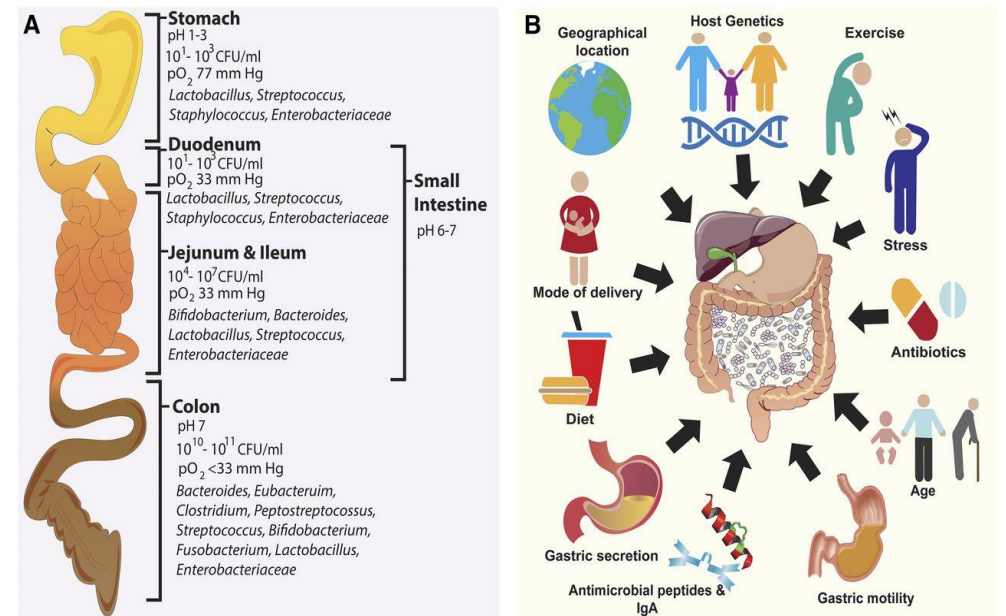
- ❑ Τα θηλαστικά ζώα αποικίζονται από πληθώρα μικροοργανισμών που ξεπερνούν τον αριθμό των κυττάρων τους κατά 10 –100 φορές: π.χ. το έντερο των ανθρώπων φιλοξενεί 10^{14} βακτήρια με περίπου 10^6 γονίδια
- ❑ Τόσο το μικροβίωμα όσο και ο ξενιστής επώφελούνται από αυτή τη συμβίωση: στο μικροβίωμα παρέχεται κατάλληλο ενδιαίτημα και ο ξενιστής επωφελείται από τη δραστηριότητα του μικροβιώματος (π.χ. διάσπαση ξενοβιοτικών ουσιών, προστασία από παθογόνα)
- ❑ Κατά τη γέννηση το ανθρώπινο σώμα αποικίζεται από περίπου 100 είδη βακτηρίων που αυξάνονται σε 700 κατά τον απογαλακτισμό και φτάνουν τα 1000 στην ενηλικίωση
- ❑ Στον άνθρωπο διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη σύνθεση του μικροβιώματος συμπεριλαμβανομένων της ηλικίας, τον τρόπο γέννησης, τύπος βρεφικής σίτισης, καθώς και ορισμένοι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως φαρμακευτική αγωγή, διατροφικές συνήθειες και το άγχος



Το μικροβίωμα των ζώων

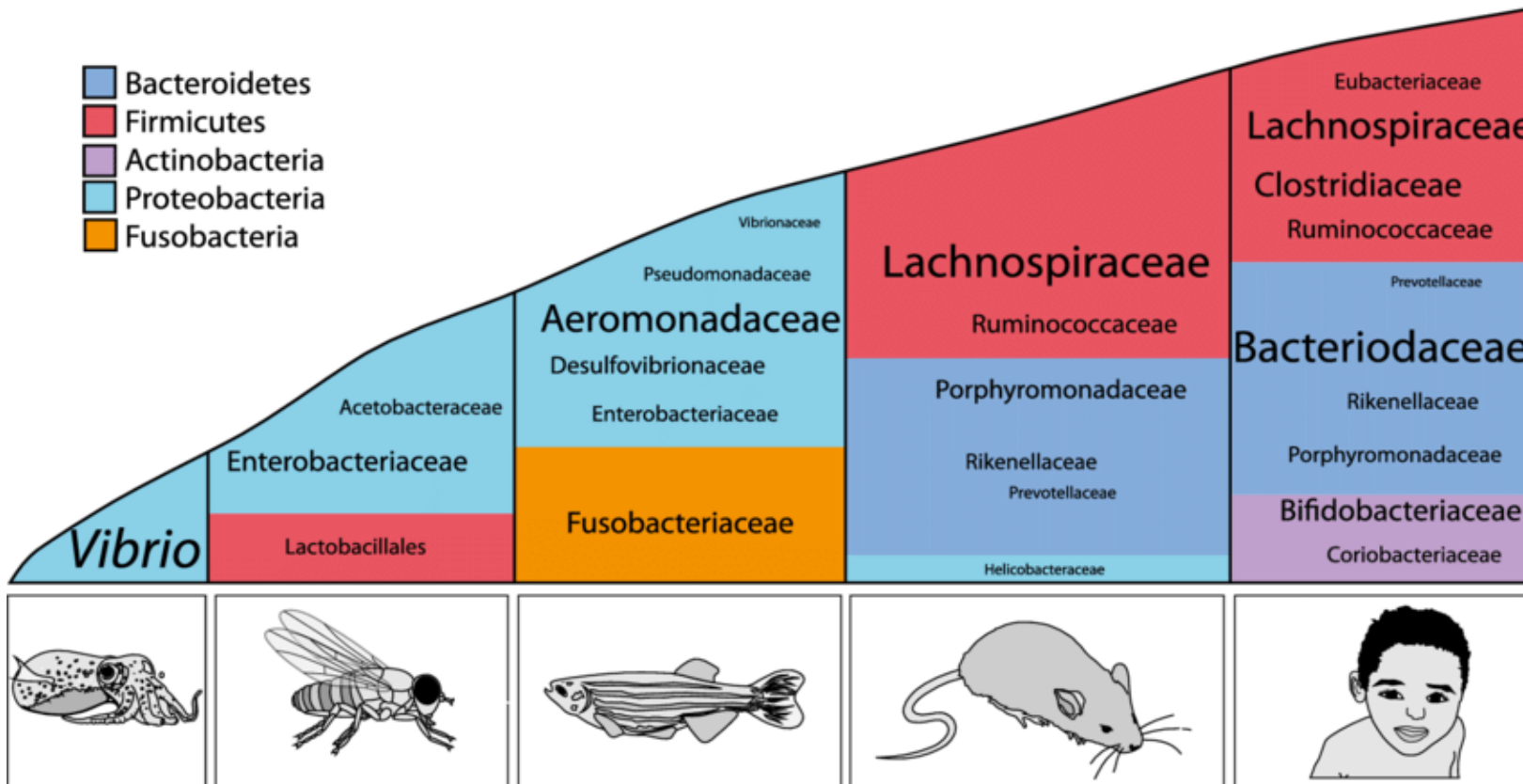
❑ Σύσταση του μικροβιώματος των θηλαστικών

- ❑ Σε επίπεδο συνομοταξίας (phylum) τα βακτήρια του εντέρου παρουσιάζουν ομοιότητες στα θηλαστικά, π.χ. στον άνθρωπο και στο ποντίκι
- ❑ Σε επίπεδο είδους όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει με μεγάλες διαφοροποιήσεις να παρατηρούνται ακόμα και ανάμεσα σε διαφορετικά είδη τρωκτικών
- ❑ Ο άνθρωπος και τα ποντίκια αποικίζονται κυρίως από βακτήρια των φύλων Firmicutes (περιλαμβάνει βακτήρια όπως κλοστρίδια, λακτοβάκιλλους, στρεπτόκοκκους και σταφυλόκοκκους), Bacteroidetes (όπως *Bacteroides*, *Porphyromonas*), Actinobacteria (όπως *Actinomyces*, *Streptomyces*), και *Proteobacteria* (που περιλαμβάνουν τα Enterobacteriaceae όπως *E. coli* ή *Helicobacter* spp.)
- ❑ Η σύσταση και η πολυπλοκότητα του μικροβιώματος των διαφορετικών τμημάτων του σώματος ποικίλει με τον μεγαλύτερο αριθμός ειδών να απαντάται στο έντερο (κυρίως Firmicutes και Bacteroidetes σε άνθρωπο και ποντίκι) και μόνο λίγα είδη απαντώνται στο στομάχι (όπου εκκρίνονται οξέα) ή στα γεννητικά όργανα



Το μικροβίωμα των ζώων

□ Η δομή του μικροβιώματος στα διάφορα είδη



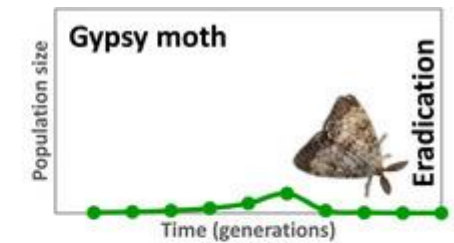
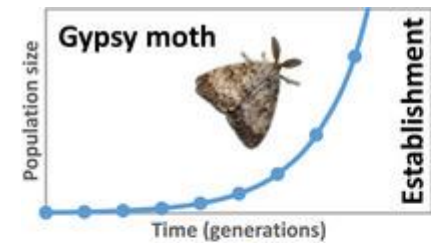
Kostic et al. 2013 GENES & DEVELOPMENT 27:701–718

□ Μολονότι μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη σύνθεση του μικροβιώματος μεταξύ των διαφόρων στελεχών ενός είδους, υπάρχουν συγκεκριμένες τάσεις μεταξύ των διαφορετικών ειδών, κυρίως σε επίπεδο συνομοταξίας (phylum)

- Τα διάφορα χρώματα αντιπροσωπεύουν τις συνομοταξίες
- Η σχετική αφθονία των χαμηλότερων ταξινομικών βαθμίδων (ομοταξία, τάξη, **οικογένεια**, **γένος**, είδος) απεικονίζεται με το μέγεθος της γραμματοσειράς

Το μικροβίωμα των ζώων

□ Τα είδη που ζούν υπό εργαστηριακές συνθήκες ή υπό αιχμαλωσία ή σε κατακερματισμένα ενδιαιτήματα εμφανίζουν μικροβίωμα χαμηλότερης ποικιλότητας σε σχέση με τους φυσικούς πληθυσμούς => τα διάφορα είδη απειλούνται άμεσα από τα διαταραγμένα ενδιαιτήματα, αλλά και έμμεσα μέσω μείωσης του μικροβιώματός τους



Low habitat fragmentation



High habitat fragmentation

Το μικροβίωμα των ζώων

- ❑ Στα ζώα η σύνδεση μεταξύ ξενιστή και μικροβιώματος μπορεί να πάρει πολλές μορφές και περιλαμβάνει σχέσεις συμβίωσης και παθογένεσης
- ❑ **Το συμβιωτικό μικροβίωμα μπορεί να είναι επωφελές για τον ξενιστή με πολλούς τρόπους:**
 - Πέψη τροφών
 - Μεταβολισμός ξενοβιοτικών ουσιών
 - Διέγερση – ενίσχυση ανοσοποιητικού συστήματος
 - Κοινωνικές αλληλεπιδράσεις
 - Προστασία από παθογόνα μέσω **διέγερσης του ανοσοποιητικού συστήματος ή μέσω ανταγωνιστικού αποκλεισμού**
- ❑ Ωστόσο όταν εκτίθενται σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες οι συμβιωτικοί μικροοργανισμοί μπορεί να δράσουν ευκαιριακά ως παθογόνα ή να μην παρέχουν τον ίδιο βαθμό προστασίας από τα παθογόνα

Π.χ. Μεταβολές τις θερμοκρασίες έχει βρεθεί να προκαλούν αλλαγές στο μικροβίωμα των κοραλιών που από συμβιωτικό μετατρέπεται σε παθογόνο

Το μικροβίωμα των ζώων

- ❑ Σε πολλά έντομα το μικροβίωμα του εντέρου είναι απαραίτητο για την επιβίωση = μικροβίωμα πυρήνας
- ❑ Ωστόσο, το μικροβίωμα δεν θα πρέπει να εξαρτάται ολοκληρωτικά από τον ξενιστή αλλά οι αλληλεπιδράσεις τους να είναι προαιρετικές και ευπροσάρμοστες και ο ξενιστής να μπορεί να φέρει διαφορετικής σύνθεσης μικροβίωμα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους
- ❑ Η σχέση μεταξύ ξενιστή και μικροβιώματος εξαρτάται από πολλούς βιοτικούς και αβιοτικούς που μπορούν να επηρεάσουν το ανοσοποιητικό, τη διατροφή, την αναπαραγωγή, την επικοινωνία και άλλα συστήματα του ξενιστή

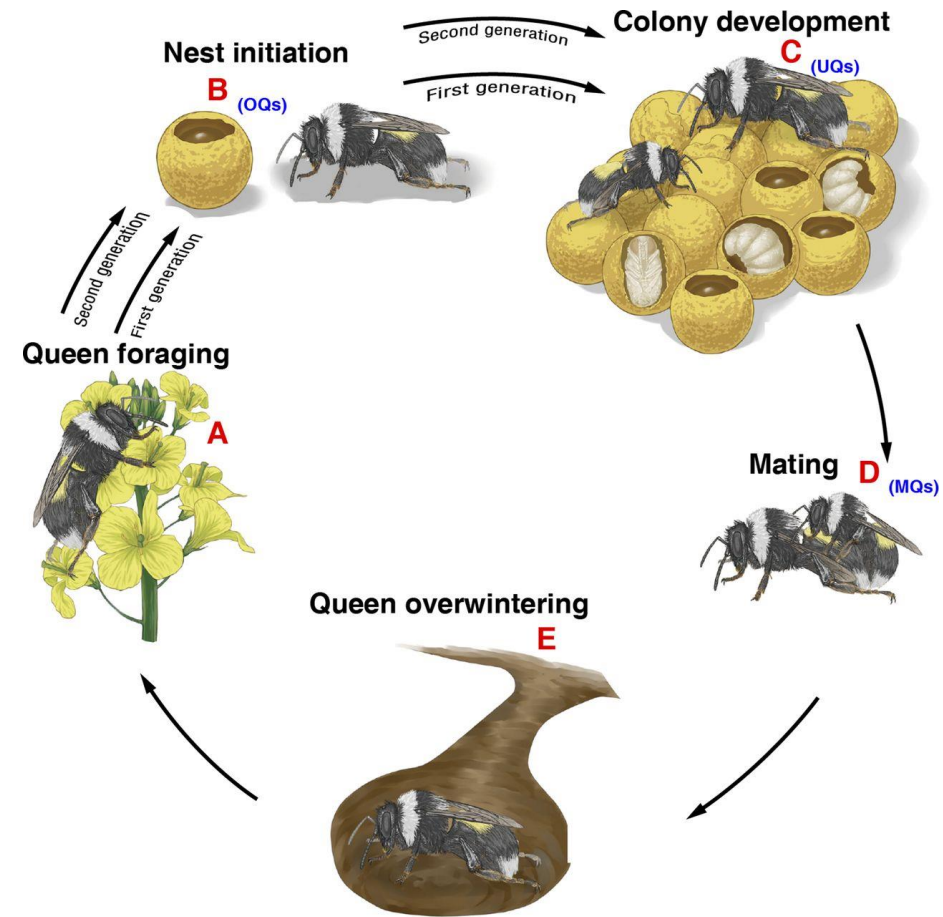
Επίδραση του μικροβιώματος στη συμπεριφορά των ζώων

- ❑ Πρόσφατες έρευνες αποκαλύπτουν το σημαντικό ρόλο του μικροβιώματος στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς πολλών ζωϊκών ειδών
- ❑ Αποκαλύπτώντας πως οι διάφορες συμπεριφορές του ξενιστή από τη διατροφή έως τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις επηρεάζουν τη σύσταση του μικροβιώματος του και πως ο μικροοργανισμοί με την σειρά τους επηρεάζουν δραματικά τη συμπεριφορά των ξενιστών
- ❑ Η γνώσεις μας σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις ξενιστή – μικροβιώματος πηγάζει από τις μελέτες των παθογόνων μικροοργανισμών
- ❑ Το ζευγάρι και η κοινωνική συμπεριφορά των ζώων επηρεάζει σημαντικά τη μετάδοση των παθογόνων και πολλά ζώα υιοθετούν συμπεριφορές για να αποφύγουν ή να απομακρύνουν τα παθογόνα






Επίδραση του μικροβιώματος στη συμπεριφορά των ζώων: παραδείγματα

- ❑ Η **κοινωνική επαφή** είναι ένας μηχανισμός που μπορεί να βοηθήσει στην απόκτηση ή την ανταλλαγή συμβιωτικού μικροβιώματος
 - Στην περίπτωση των βομβίνων *Bombus terrestris* για την απόκτηση της φυσιολογικού μικροβιώματος του εντέρου είναι απαραίτητη είτε ή άμεση επαφή μεταξύ των άλλων ατόμων στη φωλιά ή η διατροφή στα αποχωρήματα των άλλων ατόμων της φωλιάς
 - Τα άτομα που δεν είχαν ποτέ εκτεθεί στα αποχωρήματα παρουσίαζαν διαφορετικής σύστασης μικροβίωμα και ήταν πιο ευαίσθητα στο παράσιτο *Crithidia bombi*
- ❑ Το κοινωνικό πλαίσιο διαμορφώνει επίσης τις σχέσεις μεταξύ θηλαστικών και μικροβιώματος
 - Π.χ. Χιμπατζήδες της ίδιας κοινότητας φέρουν παρόμοιες μικροβιακές κοινοπραξίες σε αντίθεση με τους χιμπατζήδες άλλων κοινοτήτων



Επίδραση του μικροβιώματος στη συμπεριφορά των ζώων: παραδείγματα




Behaviors impact microbiomes

Animal	Microbial species or consortium	Interaction with behavior	Implication
 <p>Kudzu bug (<i>Megacopta cribraria</i>)</p>	<i>Ishikawaella capsulata</i>	When born, bugs feed on capsules of symbionts; if no capsules are present, nymphs wander in search of microbes	Behaviors shape symbiont acquisition
 <p>Green iguana (<i>Iguana iguana</i>)</p>	Gut microbiota	Juvenile iguanas eat soil or feces to tailor the microbiota to their current diet	Animals may adjust the microbiota at different life-history stages
 <p>Bobtail squid (<i>Euprymna scolopes</i>)</p>	<i>Vibrio fischeri</i>	Squids eject bioluminescent bacteria daily	Suggests animals can actively control their symbiont populations

- Συμπεριφορά που επηρεάζει την απόκτηση συμβιώματος
 - Το ημίπτερο *Megacopta cribraria*, έχθρος αγροτικής σημασίας (προσβάλλει ψυχανθή), γεννιέται χωρίς συμβιωτικό μικροβίωμα. Μετά τη γέννηση αποκτά συγκεκριμένο συμβιωτικό μικροβίωμα μέσα από κάψουλες βακτηρίων που του αφήνει η μητέρα του. Αν αυτές οι κάψουλες μετακινηθούν τα νεαρά έντομα επιδεικνύουν συμπεριφορά έντονης περιπλάνησης ψάχνοντας για κάψουλες βακτηρίων σε γειτονικά αβγά
 - Προσαρμογή του μικροβιώματος των ζώων σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης
 - Τα ζώα μπορούν να ελέγξουν ενεργά τους πληθυσμούς των συμβιωτών τους

Επίδραση του μικροβιώματος στη συμπεριφορά των ζώων: παραδείγματα

Microbiomes impact behaviors

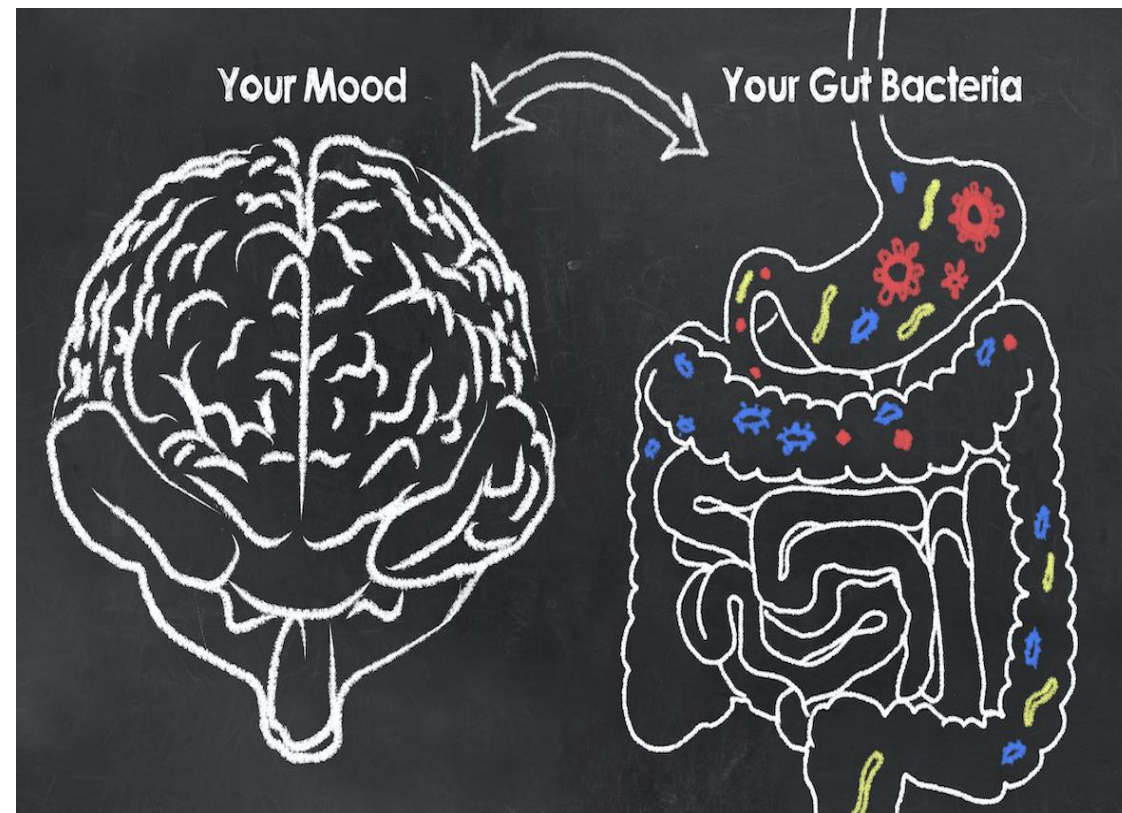
Animal	Microbial species or consortium	Interaction with behavior	Implication
 <p>Fruit fly (<i>Drosophila melanogaster</i>)</p>	Gut microbiota	Diet-specific microbiota influence mating preferences	Microbes could drive speciation
 <p>Mosquito (<i>Anopheles gambiae</i>)</p>	Human skin microbiota	Skin microbes of humans influence attraction to mosquitoes	Differential attraction could impact disease spread
 <p>Mouse (<i>Mus musculus</i>)</p>	<i>Lactobacillus rhamnosus</i>	The probiotic <i>L. rhamnosus</i> decreases anxiety in mice	Suggests bacteria can alter mood

- Το μικροβίωμα των ζώων καθοδηγεί την ειδογένεση
- Το μικροβίωμα των ζώων επηρεάζει την διασπορά εντομομεταδιδόμενων ασθενειών
- Το μικροβίωμα επηρεάζει τη διάθεση των ζώων
- Το μικροβίωμα του εντέρου των ποντικών βρέθηκε να επηρεάζει συμπεριφορές που σχετίζονται με το στρες, την ανησυχία και την κατάθλιψη μέσω επιρροής στο νευροενδοκρινικό σύστημα του ξενιστή

Πως το μικροβίωμα του εντέρου ελέγχει τη συμπεριφορά μας

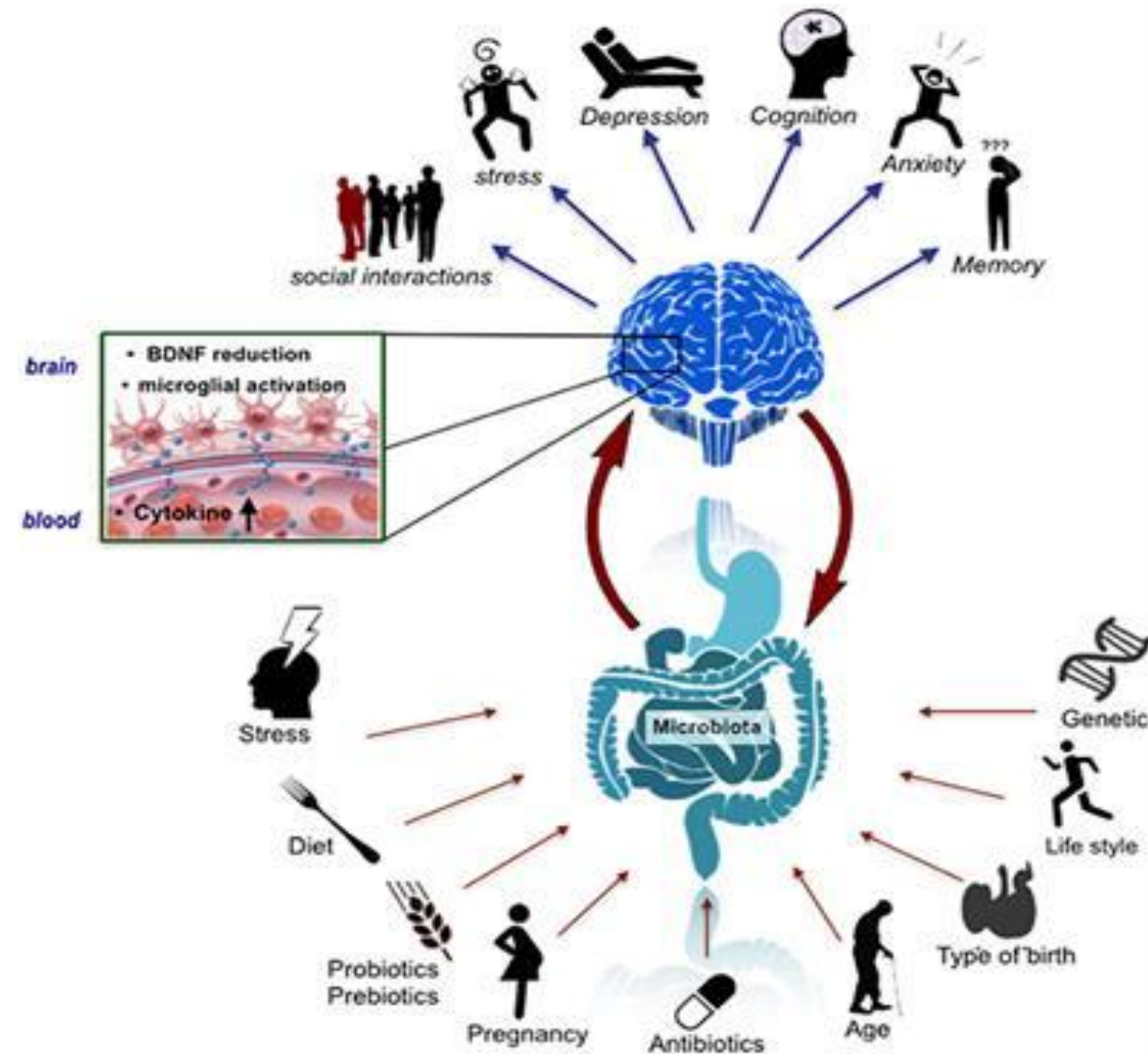
❑ The gut brain connection

- Οι άνθρωποι εξελίσσονται μέσα σε ένα μικροβιακό οικοσύστημα που συνδέεται με τη φυσιολογία τους
- Το εντερικό μικροβίωμα μπορεί να επικοινωνήσει με τον εγκέφαλο μέσω του ανοσοποιητικού συστήματος και του πνευμονογαστρικού νεύρου ή μέσω άλλων αλληλεπιδράσεων με τον ξενιστή που διευκολύνονται από τη ρύθμιση της τρυποφάνης από ορμόνες του εντέρου
- Ο μεταβολισμός και οι μικροβιακοί μεταβολίτες όπως μικρού μήκους λιπαρά οξέα επηρεάζουν την ανάπτυξη του εγκεφάλου, τη λειτουργία του και τη συμπεριφορά
- Το μικροβίωμα του εντέρου φαίνεται να παίζει ρόλο στη διαμόρφωση νοητικών δικτύων που περιλαμβάνουν συναισθηματικές και κοινωνικές τομείς των νευροαναπτυξιακών διαταραχών



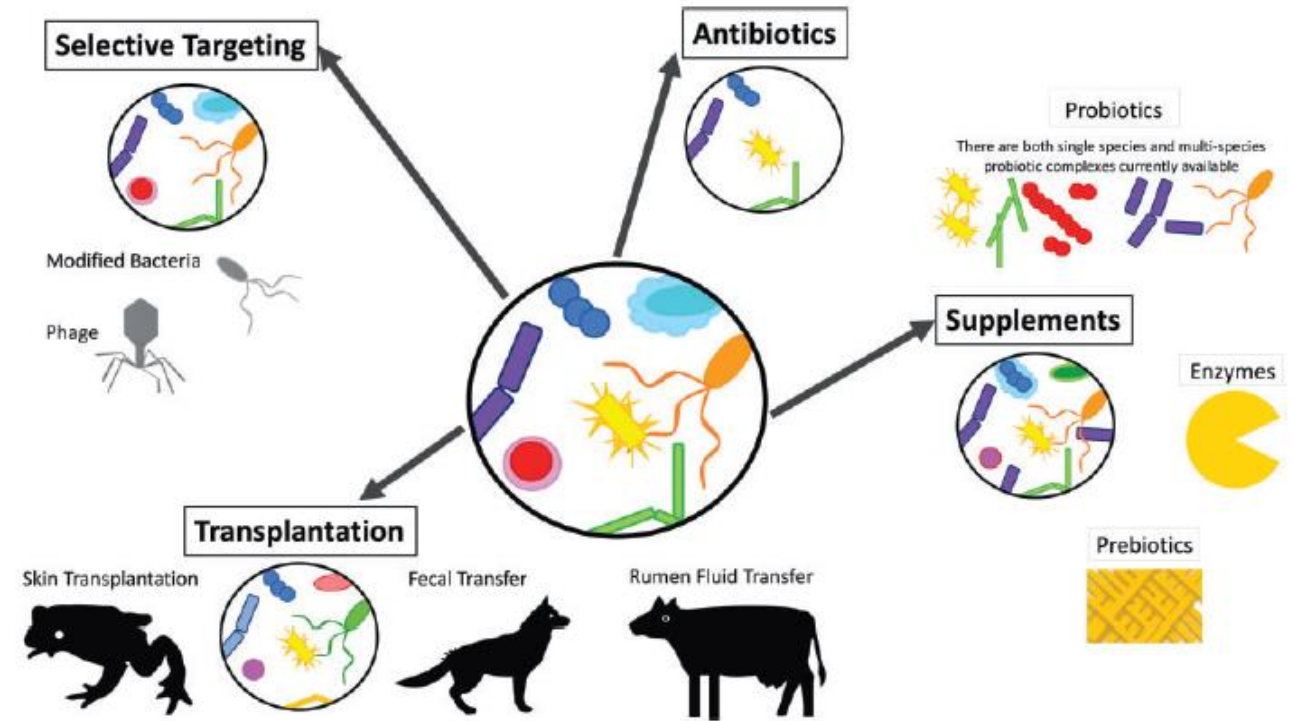
Πως το μικροβίωμα του εντέρου ελέγχει τη συμπεριφορά μας

- Ο άξονας εντερικού μικροβώματος- εγκεφάλου στην ψυχιατρική
- Ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων επηρεάζει τη συναρμολόγηση, την σύσταση και τη λειτουργία του εντερικού μικροβιώματος συμπεριλαμβανομένων του τρόπου γέννησης, διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με τη στάση ζωής όπως η διατροφή, η άσκηση και το στρες
- Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να επηρεάσουν την επικοινωνία κατά μήκος του άξονα **εντερικού μικροβώματος- εγκεφάλου**, ο οποίος εμπλέκεται σε ποικιλία χαρακτηριστικών συμπεριφοράς που σχετίζονται με την σχιζοφρένεια και τον αυτισμό και περιλαμβάνουν τη νευρικότητα και τις γνωστικές λειτουργίες



Τρόποι χειρισμού του μικροβιώματος των ζώων

- **Αντιβιοτικά:** Περιορισμός οργανισμών μη στόχων της μικροβιακής κοινότητας παράλληλα με τον οργανισμό στόχο
- **Συμπληρώματα:** Προσθήκη ενός στελέχους ή συνδιασμού ωφέλιμων στελεχών στην κοινότητα (**προβιοτικά**) ή την προσθήκη θρεπτικών που προωθούν την αύξηση των ωφέλιμων μικροοργανισμών (**πρέβιοτικά**) ή την προσθήκη βιοενεργών μικροβιακών **ενζύμων**
- **Transplants :** Προσθήκη στελεχών από ξενιστές δότες ώστε να μεταβληθεί η σύσταση της μικροβιακής κοινότητας του δέκτη και άμεσες επεμβάσεις με φάγους και gene editing (**CRISPR-Cas**) για τον περιορισμό των οργανισμών στόχων χωρίς να επηρεάζεται ολόκληρη η μικροβιακή κοινότητα



Song et al. 2019 *Experimental Biology and Medicine* 0: 1–11