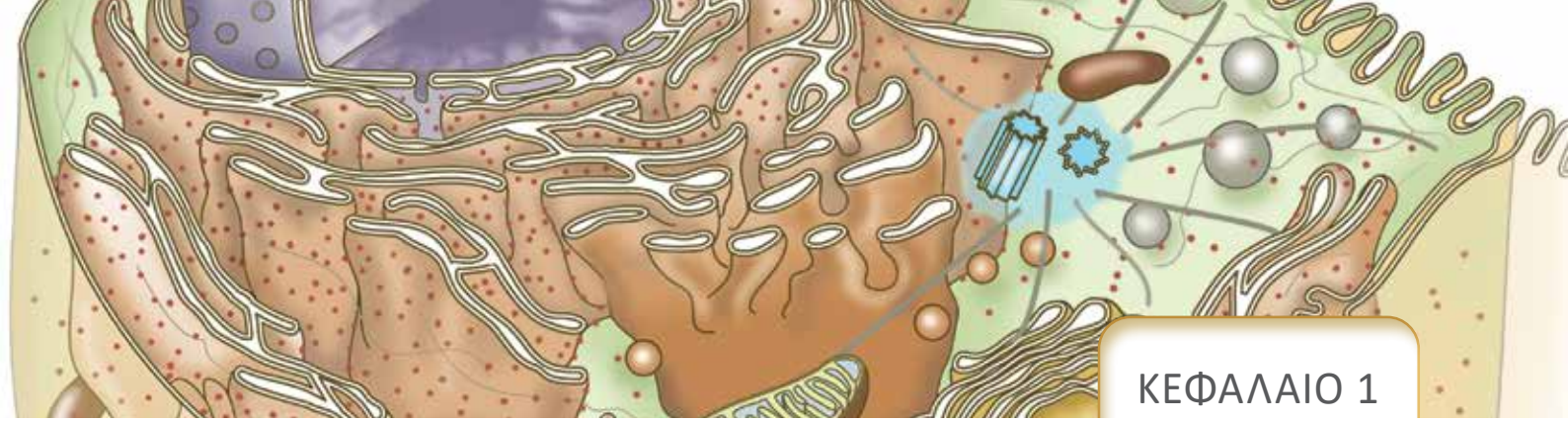


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

# Η ζωή είναι ένα ομαδικό άθλημα

## Η εξέλιξη της κυτταρικής ποικιλότητας

ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ


**1.1** Η μεγάλη εικόνα
**1.2** Η ζωή μπορεί να προκύψει από απλά συστατικά
**1.3** Όλα τα κύτταρα είναι φτιαγμένα από τις ίδιες μοριακές δομικές λίθους
**1.4** Τα κύτταρα πρέπει να συνεργαστούν για να πετύχουν
**1.5** Περίληψη κεφαλαίου


## 1.1 Η μεγάλη εικόνα

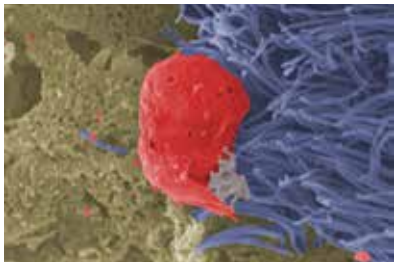
Για να κάνουμε καλή χρήση της στρατηγικής μελέτης που περιγράφηκε στη φοιτητική ενότητα αυτού του βιβλίου, ας αρχίσουμε εξετάζοντας τη συνολική οργάνωση ολόκληρου του κειμένου και συγκεκριμένα αυτού του κεφαλαίου. Καθένα από τα δεκατέσσερα κεφάλαια αυτού του βιβλίου ασχολείται με μια συγκεκριμένη αρχή της κυτταρικής βιολογίας. Ενώ δεν είναι απαραίτητο να διαβάσετε τα κεφάλαια με τη σειρά, καθένα από αυτά βασίζεται σε υλικό που έχει καλυφθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Συχνά θα χρειαστεί να ανατρέξετε σε άλλα κεφάλαια για να μάθετε περισσότερα για συγκεκριμένες έννοιες.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε το πώς εμφανίστηκε και εξελίχθηκε η ζωή στη Γη. Θα εξετάσουμε ένα ζήτημα που σήμερα βρίσκεται στο επίκεντρο όλων των βιοεπιστημών: η ζωή προέκυψε από το μηδέν σε αυτόν τον πλανήτη, ή «σπάρθηκε» από εξωγήινη ύλη που έπεσε στην επιφάνεια της Γης; Εάν αποδειχθεί ότι ισχύει το δεύτερο, τότε μπορεί να υπάρχει ζωή στο σύμπαν και να υπόκειται στους ίδιους κανόνες εξέλιξης που οδήγησαν στην εμφάνιση της τεράστιας ποικιλίας μορφών ζωής στη Γη.

Ένα από τα σημαντικότερα μαθήματα που διδαχθήκαμε είναι ότι οι οργανισμοί, καθώς και τα μόρια από τα οποία αποτελούνται, δεν λειτουργούν ποτέ μεμονωμένα. Ακόμη και οι απλούστεροι μονοκύτταροι οργανισμοί ζουν σε ένα πολύπλοκο χημικό περιβάλλον και η ύπαρξή τους εξαρτάται από την ικανότητά τους να συνεργάζονται με τους οργανισμούς με τους οποίους έρχονται σε επαφή. Το ίδιο ισχύει επίσης για τα μόρια που βρίσκονται στο εσωτερικό των κυττάρων: ουσιαστικά

κάθε κυτταρική λειτουργία εξαρτάται από ομάδες διαφορετικών μορίων που αλληλεπιδρούν με εξειδικευμένους τρόπους βοηθώντας τα κύτταρα να τρέφονται, να αναπαράγονται, να εκκρίνουν άχρηστες ουσίες και να αμύνονται από επιθέσεις.

Με απλούς όρους, μπορούμε να συνοψίσουμε τα παραπάνω ως την **1η Αρχή της κυτταρικής βιολογίας: η ζωή είναι ένα ομαδικό άθλημα** (βλ. Ένθετο 1-1). Κάθε κυτταρική λειτουργία που εξετάζεται σε αυτό το βιβλίο απαιτεί ομάδες μορίων, με κάθε μέλος να παίζει το ρόλο του σε έναν, μερικές φορές, συγκλονιστικά περίπλοκο χορό. Εστιάζοντας στα μόρια που απαρτίζουν την κάθε λειτουργική ομάδα, στους ρόλους τους και στην ακολουθία των δραστηριοτήτων τους, θα μπορέσουμε να δημιουργήσουμε ένα πλαίσιο που θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τις λεπτομέρειες.



1η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΚΥΤΤΑΡΙΚΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ

**Η ζωή είναι ένα ομαδικό άθλημα.**

Η φωτογραφία είναι ευγενική προσφορά των Andrew S. Mount, PhD, Jonathan Stewart, Nichole Hickman, Michael Groce, Ερευνητικό Εργαστήριο Okeanos, Πανεπιστήμιο Clemson.

## ΕΝΘΕΤΟ 1-1 **Υπόδειξη**

Στόχος μας σε κάθε κεφάλαιο του βιβλίου είναι να κατανοήσουν οι φοιτητές μία έννοια της κυτταρικής βιολογίας σε επίπεδο που ανταποκρίνεται στο υπόβαθρο και τα ενδιαφέροντά τους. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με το βαθμό των λεπτομερειών που αναζητούν, μπορεί να μη χρειαστεί να διαβάσουν ένα ολόκληρο κεφάλαιο, ή μπορεί να πρέπει να αναζητήσουν πιο εξειδικευμένα κείμενα. Είναι σημαντικό να ρωτούν τον/την διδάσκοντα του μαθήματος ποιο επίπεδο εμβάθυνσης θεωρείται ενδεδειγμένο για το μάθημά του/της.

Σας παρακαλούμε να διαβάσετε αυτό το κεφάλαιο με ανοιχτό μυαλό και να θυμάστε ότι η κυτταρική βιολογία, όπως και όλοι οι επιστημονικοί τομείς, δεν είναι μία μελέτη του απόλυτου. Αντίθετα, αξιολογούμε τα αποτελέσματα από σωστά ελεγχόμενα πειράματα και αποφασίζουμε εάν αυτά τα αποτελέσματα υποστηρίζουν μια προτεινόμενη εξήγηση για όσα γνωρίζουμε σχετικά με τον τρόπο ζωής των οργανισμών και την προσαρμογή τους σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Σπάνια δηλώνουμε ότι μια δεδομένη εξήγηση είναι αναμφισβήτητα αληθής ή λανθασμένη και συχνά, οι εξηγήσεις μας πρέπει να αναθεωρούνται καθώς συλλέγονται νέα δεδομένα. Μερικές φορές βρίσκουμε νέα μέλη της ομάδας, αλλάζουμε τους ρόλους τους, ή αναδιοργανώνουμε τη σειρά με την οποία ενεργούν.

Ένα εξαιρετικό παράδειγμα απροσδόκητου αποτελέσματος είναι η ζωή ενός διάσημου επιστήμονα, του Βρετανού φυσικού Stephen Hawking. Όταν διαγνώσθηκε με τη θανατηφόρο νόσο της αμυοτροφικής πλευρικής σκλήρυνσης (ALS) σε ηλικία 21 ετών, οι περισσότεροι γιατροί του δεν περίμεναν να ζήσει περισσότερο από λίγα χρόνια. Αντίθετα, έζησε μια μακρά και παραγωγική ζωή, πεθαίνοντας σε ηλικία 76 ετών. Χρόνια μετά την αρχική διάγνωση, οι γιατροί ανακάλυψαν ότι ο όρος ALS αναφέρεται σε μια ομάδα (στενά) συγγενών ασθενειών και ότι ο Δρ. Hawking έπασχε από μια αργά εξελισσόμενη μορφή της ALS. Καθώς γίνονταν διαθέσιμα όλο και περισσότερα δεδομένα, η διάγνωση και η ιατρική περίθαλψη του Δρ. Hawking αναθεωρήθηκαν ώστε να ανταποκρίνονται καλύτερα στην ιατρική του κατάσταση. Με όρους της Πρώτης Αρχής, ο κατάλογος των μορίων και των κυττάρων που ήταν υπεύθυνα για την κατάστασή του άλλαξε καθώς οι γιατροί μάθαιναν περισσότερα για την ασθένειά του.

Αυτό το κεφάλαιο θα ακολουθήσει το ταξίδι από την εμφάνιση της ζωής στη Γη έως την εξέλιξη των προκαρυωτικών κυττάρων και τη μετάβαση από τους απλούς προκαρυώτες στην ανάπτυξη των πιο πολύπλοκων ευκαρυωτών. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια συζήτηση σχετικά με τη σημασία των ολοβιωτών – συστημάτων ευκαρυωτικών και προκαρυωτικών κυττάρων που επικοινωνούν μεταξύ τους με συναρπαστικούς και απίστευτους τρόπους. Στην πράξη, τα ανθρώπινα σώματα είναι εξαιρετικά παραδείγματα αυτής της συνεργασίας και ομαδικής εργασίας.

Το Κεφάλαιο 1 οργανώνεται σε τρεις μεγάλες ενότητες:

- Η πρώτη ενότητα, *Η ζωή μπορεί να προκύψει από απλά συστατικά,* χρησιμεύει ως εισαγωγή σε ορισμένες βασικές έννοιες που αποτελούν το θεμέλιο για την υποστήριξη της ζωής. Εδώ περιλαμβάνεται ο ορισμός της ζωής που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτό το βιβλίο, μια περιγραφή των απαιτούμενων συνθηκών για τη δημιουργία των πρώτων κυττάρων στη Γη, μια ανασκόπηση της εξέλιξης μέσω της φυσικής επιλογής, μια εισαγωγή στην έννοια της βιολογίας του κώδικα και μια σύντομη συζήτηση της πιθανότητας ύπαρξης ζωής σε άλλους πλανήτες.
- Η δεύτερη ενότητα, *Όλα τα κύτταρα είναι φτιαγμένα από τις ίδιες μοριακές δομικές λίθους*, εισάγει βασικές αρχές της χημείας που διέπουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης μεταξύ μορίων στους ζωντανούς οργανισμούς. Αυτή η ενότητα παραθέτει, επίσης, ορισμένες από τις πιο γνωστές χημικές δομές που απαντώνται στα βιομόρια. Οι δομές αυτές συνιστούν βασικό παράγοντα για την κατανόηση της σχέσης δομής-λειτουργίας, μία έννοια κλειδί για στη βιολογία, που θα αναφέρεται συχνά σε αυτό το βιβλίο. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει επίσης μια λεπτομερή ανάλυση των σακχάρων. Οι πληροφορίες αυτές θα αξιοποιηθούν στο Κεφάλαιο 2, όπου εξετάζουμε πως χρησιμοποιούνται τα σάκχαρα για τη σύνθεση των νουκλεοτιδίων, μιας άλλης κατηγορίας κυτταρικών δομικών λίθων. Δώστε ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο συναρμολόγησης των σακχάρων σε πολυμερή, καθώς θα ανατρέξουμε σε αυτά τα πολυμερή στα επόμενα κεφάλαια.
- Η τρίτη ενότητα, *Τα κύτταρα πρέπει να συνεργαστούν για να πετύχουν*, εξηγεί πως οι προκαρυώτες ήταν οι πρώτοι οργανισμού που δημιουργήθηκαν στη Γη και δείχνει πόσο σημαντική είναι η μοριακή και κυτταρική συνεργασία για τη συνεχή επιβίωση τους. Αυτή η ενότητα εξετάζει επίσης τον τρόπο με τον οποίοι οι ευκαρυώτες εξελίχθηκαν από ομάδες προκαρυωτικών οργανισμών και για ποιο λόγο αυτή η συνεργασία επέτρεψε την εμφάνιση της τεράστιας ποικιλίας ευκαρυωτικών μορφών ζωής στη Γη. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των ευκαρυωτών είναι τα εσωτερικά, μεμβρανικά διαμερίσματα που ονομάζονται οργανίδια. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι αυτά τα οργανίδια έχουν πολλαπλές λειτουργίες, επομένως τα περισσότερα από αυτά θα εμφανίζονται σε διάφορα κεφάλαια. Πολλοί φοιτητές έχουν την τάση να αντιστοιχούν ένα οργανίδιο σε μία ή δύο συγκεκριμένες κυτταρικές λειτουργίες (π.χ. πυρήνας = αντιγραφή του DNA), ενώ στην πραγματικότητα κάθε οργανίδιο μπορεί να πραγματοποιεί πολλές διαφορετικές λειτουργίες την ίδια στιγμή. Επομένως, όταν εξετάζουμε το πακετάρισμα του δεοξυριβονουκλεϊκού οξέος (DNA) (Κεφάλαιο 2), την αντιγραφή του DNA (Κεφάλαιο 7), τη μεταφορά μέσω του πυρηνικού πόρου (Κεφάλαιο 8) και τη ρύθμιση της γονιδιακής έκφρασης (Κεφάλαιο 12), να θυμάστε ότι όλα αυτά συμβαίνουν ταυτόχρονα στον πυρήνα και ότι συχνά όλα αυτά αλληλοεπηρεάζονται. Είναι σημαντικό να έχουμε πάντα κατά νου αυτή τη συνολική εικόνα ενός κυττάρου καθώς εξετάζουμε καθεμία από τις δεκατέσσερις αρχές αυτού του βιβλίου. Αυτή η ενότητα ολοκληρώνεται με την παρουσίαση ομάδων ευκαρυωτικών και προκαρυωτικών κυττάρων που συνεργάζονται στενά και ονομάζονται **ολοβιώτες**. Οι ολοβιώτες αποτελούν ένα εντυπωσιακά μεγάλο ποσοστό των έμβιων όντων που συναντάμε στην καθημερινή ζωή, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου.

Θα επανεξετάσουμε καθένα από αυτά τα θέματα, εκτός από τα σάκχαρα, πολύ πιο λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια του βιβλίου. Ενώ τα περισσότερα από τα επόμενα κεφάλαια είναι μικρότερης έκτασης, περιέχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα σημαντικών λεπτομερειών. Η εξέταση αυτών των λεπτομερειών θα δώσει στους φοιτητές την ευκαιρία να εφαρμόσουν τις δεξιότητες μελέτης

που θα αναπτύξουν σε αυτό το κεφάλαιο. Καλώς ήρθατε στον κόσμο της κυτταρικής βιολογίας. Ας ξεκινήσουμε!

## 1.2 Η ζωή μπορεί να προκύψει από απλά συστατικά

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Τα έμβια όντα αποτελούνται από ορισμένα από τα πιο κοινά άτομα και μόρια στη Γη.
- Το νερό σε υγρή μορφή είναι απαραίτητο για τη διατήρηση όλων των γνωστών έμβιων όντων.
- Οι βιολογικοί κώδικες βοηθούν να εξηγηθεί πώς απλά μόρια συνδυάζονται για να σχηματίσουν ζωντανούς οργανισμούς.
- Χημικά και φυσικά αποδεικτικά στοιχεία υποστηρίζουν την πιθανότητα ύπαρξης εξωγήινης ζωής.

Για τους περισσότερους κυτταρικούς βιολόγους, ο ορισμός της λέξης *ζωή* είναι αρκετά απλός: είναι ένα χημικό σύστημα ικανό για Δαρβινική εξέλιξη. Επομένως, τα έμβια όντα πρέπει να είναι σε θέση να *αυτο-αντιγράφονται και να αυτο-διορθώνονται* (δηλαδή να επανέρχονται σε μια καθορισμένη κατάσταση μέσω της επιδιόρθωσης των βλαβών). Με πιο απλά λόγια, μπορούμε να πούμε ότι όλα τα έμβια όντα αντιγράφονται (δημιουργούν απογόνους) και διορθώνουν τα γενετικά σφάλματά τους. Στην ιεραρχία της βιολογικής πολυπλοκότητας, μεμονωμένα μόρια, όπως πρωτεΐνες ή DNA, δεν θεωρούνται ζωντανά, ακόμη κι αν βρίσκονται στο εσωτερικό ενός ζωντανού οργανισμού, επειδή στερούνται της μίας ή και των δύο αυτών ικανοτήτων. Παρόλο που πολλά από αυτά τα μόρια (π.χ. ένζυμα) μπορούν να καταλύσουν χημικές αντιδράσεις, καμία μεμονωμένη χημική αντίδραση δεν μπορεί ταυτόχρονα να αναπαράγει *και* να επιδιορθώσει αυτά τα μόρια.

Από αυτές τις παρατηρήσεις, είναι σαφές ότι η ζωή είναι ένα χαρακτηριστικό που διαθέτουν μόνο ομάδες μορίων που συνεργάζονται μεταξύ τους. Οι βιολόγοι πιστεύουν ότι τα πρώτα βιολογικά μόρια ήταν απλά μόρια ικανά για αυτο-αντιγραφή. Μόλις αυτά τα μόρια περικλείστηκαν σε έναν επιλεκτικό φραγμό, που ονομάζεται **μεμβράνη**, ήταν ικανά να σχηματίσουν ομάδες που συνεργάζονταν για να διατηρήσουν ένα σχετικά σταθερό εσωτερικό περιβάλλον, ακόμη και όταν οι συνθήκες έξω από τη μεμβράνη διέφεραν σημαντικά. Οι μοριακές ομάδες που ανέπτυξαν την πρόσθετη ικανότητα επιδιόρθωσης ή αντικατάστασης των μελών της ομάδας που είχαν υποστεί βλάβη, ήταν στη συνέχεια σε θέση να αυτο-αντιγράφονται, συμπεριλαμβανομένης της μεμβράνης. Αυτή η περικλειόμενη σε μεμβράνη ομάδα μορίων ονομάζεται σήμερα **κύτταρο**. Η μεμβράνη συχνά αναφέρεται ως **πλασματική μεμβράνη** ή **κυτταρική μεμβράνη** και περικλείει ένα διαμέρισμα που ονομάζεται **κυτταρόπλασμα**. Επειδή το κύτταρο είναι η απλούστερη μονάδα οργάνωσης της ζωής, αναφέρεται επίσης ως θεμελιώδης μονάδα ζωής (βλ. Ένθετο 1-2). Όλα τα έμβια όντα αποτελούνται από κύτταρα. Τα απλούστερα κύτταρα ονομάζονται **προκαρυώτες**, ώστε να διακρίνονται από τα πιο περίπλοκα κύτταρα τα οποία είναι γνωστά ως ευκαρυώτες.

### Οι άψυχες ουσίες συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ζωή

Σημαντικά πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι το πρώτο κύτταρο στη Γη προέκυψε μέσω αβιοτικών χημικών αντιδράσεων. Αυτό είναι πολύ εντυπωσιακό: πριν από την εμφάνιση της ζωής, όλα στη Γη ήταν, εξ ορισμού, αβιοτικά (δεν είχαν ζωή). Αλλά πώς συνέβη αυτός ο αξιοσημείωτος μετασχηματισμός; Οι πιο ενδιαφέρουσες και αξιόπιστες έρευνες προτείνουν ότι η εμφάνιση της ζωής βασίστηκε στις ενώσεις υδρόθειο και υδροκυάνιο (βλ. Ένθετο 1-3). Η χημική αναγωγή του υδροκυανίου από το υδρόθειο, καταλυόμενη από υπεριώδη ακτινοβολία, επέτρεψε στα άτομα του άνθρακα να σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ τους. Αυτή η διαδικασία, με τη σειρά της,

## ΕΝΘΕΤΟ 1-2 ΣΥΧΝΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ: **Οι ιοί είναι ζωντανοί οργανισμοί;**

Ένα ζήτημα που συνεχίζει να αποτελεί αντικείμενο διαφωνίας μεταξύ των βιολόγων είναι εάν οι ιοί, οι οποίοι μολύνουν ένα ζωντανό κύτταρο για να αντιγραφούν, είναι ζωντανοί οργανισμοί. Ένα συχνό επιχείρημα που υποστηρίζει τον ορισμό του ζωντανού οργανισμού είναι ότι οι ιοί έχουν την ικανότητα να αντιγράφονται με ακρίβεια ακολουθώντας τους ίδιους τύπους οδηγιών (τον γενετικό κώδικα του DNA και του ριβονουκλεϊκού οξέος [RNA]) που χρησιμοποιούν όλοι οι άλλοι ζωντανοί οργανισμοί. Οι υπέρμαχοι του ορισμού του ζωντανού οργανισμού υποστηρίζουν επίσης ότι η εξάρτηση του ιού από το κύτταρο για την αντιγραφή του μοιάζει με την εξάρτηση των μεμονωμένων κυττάρων ενός πολυκύτταρου οργανισμού από ολόκληρο τον οργανισμό (π.χ. για να διαιρεθεί ένα δερματικό κύτταρο, πρέπει το ζώο να είναι ζωντανό). Όσοι διαφωνούν με αυτήν την άποψη υποστηρίζουν ότι οι ιοί δεν έχουν ικανότητα αυτοεπιδιόρθωσης. Εάν ένα ιικό σωματίδιο υποστεί βλάβη, δεν θα επιδιορθώσει ποτέ τη βλάβη. Μπορεί μόνο να επιχειρήσει να δημιουργήσει νέα ιικά σωματίδια. Μεγάλο μέρος αυτής της διαφωνίας πηγάζει από το γεγονός ότι δεν υπάρχει κοινά αποδεκτός ορισμός της ζωής. Παρ' όλα αυτά, είναι σαφές ότι οι ιοί συμβάλλουν στη μεταφορά γενετικής πληροφορίας στους οργανισμούς και ότι εμφανίστηκαν πολύ νωρίς κατά την εξέλιξη της ζωής.

## ΕΝΘΕΤΟ 1-3 ΥΠΟΔΕΙΞΗ: **Χρησιμοποιήστε σωστά το διαδίκτυο**

Όλοι χρησιμοποιούμε μηχανές αναζήτησης στο διαδίκτυο στην καθημερινή μας ζωή για να αποκτήσουμε πληροφορίες, να επιλύσουμε προβλήματα και να επικοινωνήσουμε μεταξύ μας. Οι επιστήμονες δεν διαφέρουν: μια πληθώρα πληροφοριών για την κυτταρική και μοριακή βιολογία διατίθενται δωρεάν στο διαδίκτυο. Το βιβλίο αυτό προϋποθέτει ότι ο αναγνώστης έχει άμεση πρόσβαση σε online πληροφορίες και τις χρησιμοποιεί συχνά. Αλλά όπως και στην καθημερινή ζωή, δεν είναι πάντα αξιόπιστες οι πληροφορίες. Ένα από τα βασικά βήματα για να γίνει κανείς επαγγελματίας επιστήμονας είναι να μάθει να διακρίνει τις αξιόπιστες, τεκμηριωμένες πηγές πληροφοριών από τις υπόλοιπες. Μερικές από τις καλύτερες πληροφορίες για τη βιολογία συλλέγονται από το Εθνικό Κέντρο Πληροφοριών Βιοτεχνολογίας των Ηνωμένων Πολιτειών και είναι ελεύθερα προσβάσιμες. Άλλες πηγές είναι επαγγελματικές εταιρείες, όπως:

- Αμερικανική Ένωση για την Προώθηση της Επιστήμης (AAAS)
- Ομοσπονδία Αμερικανικών Εταιριών για την Πειραματική Βιολογία (FASEB)
- Αμερικανική Εταιρία Κυτταρικής Βιολογίας (ASCB)
- Ομοσπονδία Ευρωπαϊκών Εταιριών Βιοχημείας (FEBS)
- Ένωση Ακαδημιών και Επιστημονικών Εταιριών της Ασίας (AASSA)
- Δίκτυο Αφρικανικών Επιστημονικών Ακαδημιών (NASAC)
- iBiology

Επειδή αυτοί οι οργανισμοί απευθύνονται κυρίως σε επαγγελματίες επιστήμονες, η «καμπύλη μάθησης» για την κατανόηση των πληροφοριών τους μπορεί μερικές φορές να είναι εξαιρετικά δύσκολη για τους αρχάριους. Ωστόσο, οι περισσότερες επιστημονικές εταιρίες καταβάλλουν σημαντική προσπάθεια για την ενημέρωση του κοινού, συχνά μέσω σύντομων βίντεο. Σχεδόν κάθε θέμα που συζητείται σε αυτό το βιβλίο έχει πολλά βίντεο αφιερωμένα σε αυτό, και πολλά από αυτά είναι εξαιρετικά. Για παράδειγμα, αναζητήστε το «Βίντεο για υδρόθειο, υδροκυάνιο και προέλευση της ζωής» για να μάθετε περισσότερα σχετικά με το ρόλο που έπαιξαν αυτά τα μόρια στην αρχή της ζωής. Ζητήστε από τον διδάσκοντά σας οδηγίες σχετικά με τις πληροφορίες που πρέπει να αναζητήσετε για το μάθημά σας.

σχημάτισε πολυανθρακικά σύμπλοκα που δεσμεύτηκαν σε άλλα άτομα και αναδιατάχθηκαν μέχρι να σχηματίσουν τα μόρια που διασφαλίζουν την αποθήκευση και τη μεταβίβαση της βιολογικής πληροφορίας (ριβονουκλεοτίδια), τη διαμερισματοποίηση χημικών αντιδράσεων (λιπίδια) και την κατάλυση των χημικών αντιδράσεων που είναι απαραίτητες για τη διατήρηση των κυττάρων στη ζωή (ριβονουκλεοτίδια και αμινοξέα). (Θα εξετάσουμε αυτά τα μόρια πιο λεπτομερώς στα Κεφάλαια 2-4). Αυτά τα γεγονότα πιθανώς συνέβησαν ανεξάρτητα και στη συνέχεια συνδυάστηκαν, ενδεχομένως εκατομμύρια φορές. Όταν τα αρχέγονα μόρια συνεργάστηκαν αρκετά ώστε να μπορούν να αντιγράφονται και να αυτο-διορθώνονται ως ολοκληρωμένο σύστημα, ξεκίνησε η ζωή.

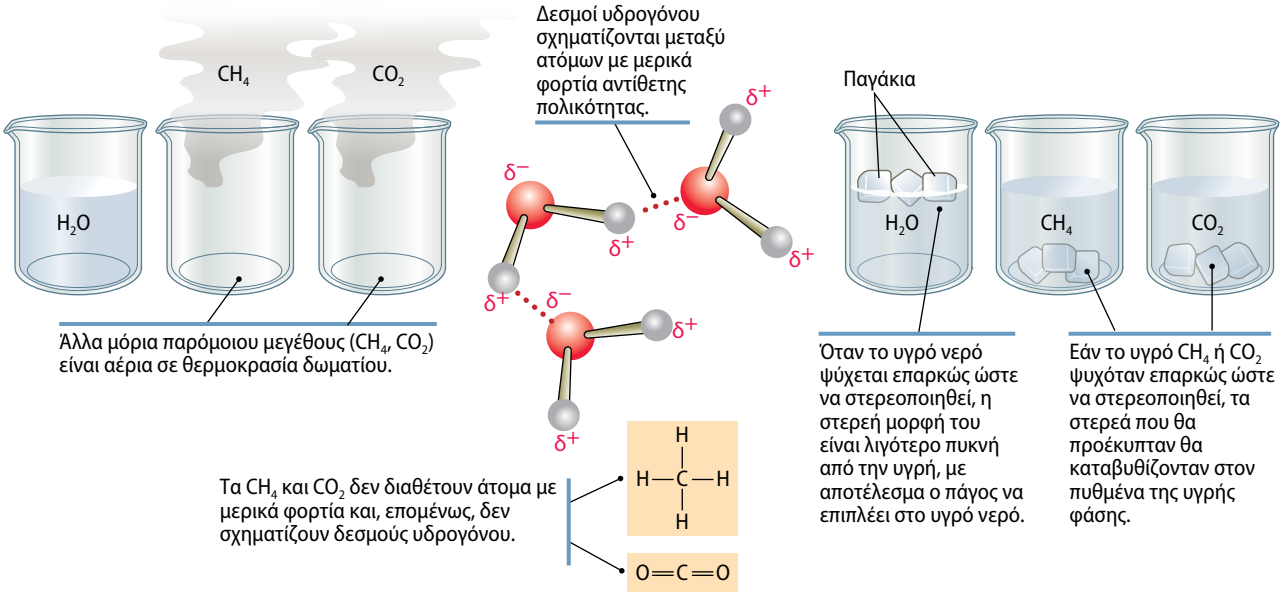
## Ο σχηματισμός των μεμβρανών απαιτεί νερό

Ο σχηματισμός των λιπιδίων είναι πιθανώς το πιο σημαντικό από αυτά τα αβιοτικά συμβάντα επειδή πολλά λιπίδια δημιουργούν με φυσικό τρόπο διαμερίσματα σε υδατικά διαλύματα. Αυτό επιτρέπει τη διεξαγωγή πολλών διαδοχικών χημικών αντιδράσεων εντός του ίδιου διαμερίσματος, μια βασική απαίτηση για την εμφάνιση της ζωής στη Γη. Οι επιστήμονες περιγράφουν αυτά τα διαμερίσματα που περιβάλλονται από τα λιπίδια ως «φυσικούς δοκιμαστικούς σωλήνες» μέσα στους οποίους διεξάγονται κυτταρικά πειράματα. Εντός αυτών των αρχέγονων μεμβρανών, τα πρώιμα κύτταρα ανέπτυξαν τις απαραίτητες δεξιότητες για την επιβίωση και την αντιγραφή τους. Όλοι οι οργανισμοί έχουν κληρονομήσει αυτές τις σημαντικές δεξιότητες. Ένα σημαντικό μάθημα που έχουμε αποκομίσει είναι ότι ακόμη και οι πιο σύγχρονοι οργανισμοί βασίζονται στις ίδιες έννοιες για να διατηρηθούν ζωντανοί. Με απλά λόγια, η ζωή εξακολουθεί να είναι αδύνατη απουσία νερού σε υγρή μορφή, περίπου 3,5 δισεκατομμύρια χρόνια μετά την εμφάνιση των πρώτων κυττάρων στη Γη. Γιατί το νερό;

### Το νερό είναι η πιο συνηθισμένη ένωση που βρίσκεται στα κύτταρα

Το νερό είναι τόσο συνηθισμένο στη βιολογία που συχνά το παίρνουμε ως δεδομένο. Όλα τα ζωντανά κύτταρα, συμπεριλαμβανομένων των ξηρότερων σπόρων των φυτών και των μυκήτων, περιέχουν νερό. Στα περισσότερα κύτταρα, το νερό είναι το μόριο που βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία. Για να κατανοήσουμε την πραγματική σημασία του, πρέπει να δώσουμε έμφαση στα πέντε χαρακτηριστικά που το κάνουν ξεχωριστό (**Εικόνα 1-1**):

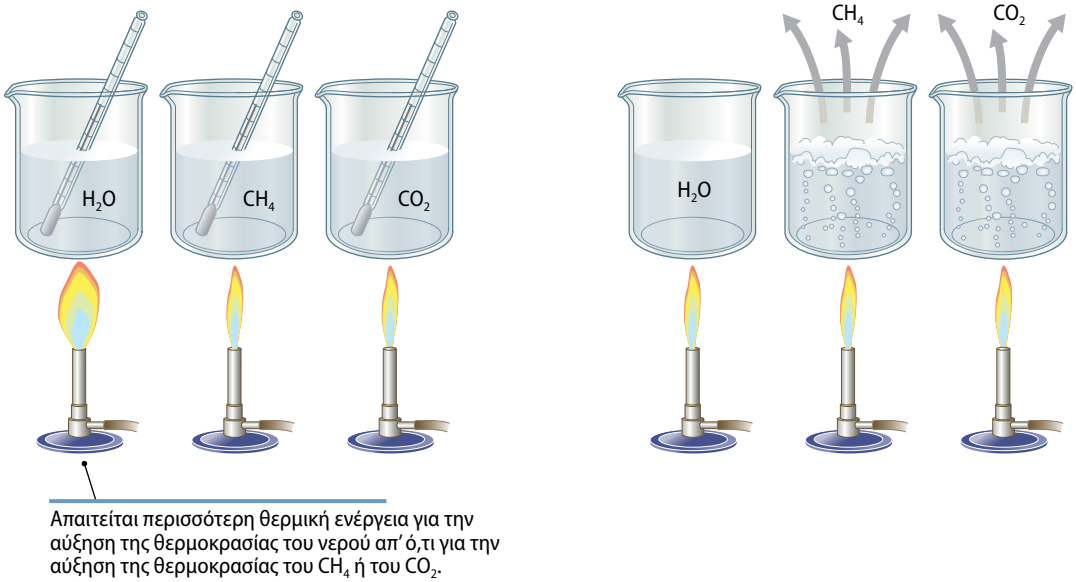
- Πρώτον, το νερό είναι το μόνο μόριο με αυτό το μέγεθος που, σε θερμοκρασία δωματίου και φυσιολογική ατμοσφαιρική πίεση, υφίσταται σε υγρή μορφή, (ενώσεις παρόμοιας μάζας, όπως το μεθάνιο και η αμμωνία, είναι αέρια σε αυτές τις συνθήκες).
- Δεύτερον, το νερό είναι ένα πολύ πολικό μόριο. Συγκεκριμένα, η υψηλή ηλεκτραρνητικότητα του οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου που εμπλέκεται στον ομοιοπολικό δεσμό να περνά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου του σε περιστροφή γύρω από τον πυρήνα του ατόμου οξυγόνου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί έναν μη ισορροπημένο δεσμό. Επειδή το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε τροχιά κυρίως γύρω από το οξυγόνο, το οξυγόνο αποκτά μερικώς αρνητικό φορτίο (συνήθως αναπαρίσταται με το σύμβολο δ–), ενώ κάθε άτομο υδρογόνου γίνεται μερικώς θετικό (αναπαρίσταται ως δ+). Η ανισορροπία φορτίου είναι εκείνη που συγκρατεί τα μόρια του νερού τόσο σφιχτά μεταξύ τους και εξηγεί για ποιο λόγο βρίσκεται σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία δωματίου: το δ– του ατόμου του οξυγόνου προσελκύει το δ+ των ατόμων του υδρογόνου σε γειτονικά μόρια νερού και αντιστρόφως. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως **δεσμός υδρογόνου** και παρατηρείται και σε άλλα μόρια.
- Τρίτον, η υγρή φάση του νερού έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από τη στερεή φάση του σε κανονικές συνθήκες (δηλαδή, ο πάγος επιπλέει στο νερό). Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί επίσης να εξηγηθεί από τους πανταχού παρόντες δεσμούς υδρογόνου που παρατηρούνται στο νερό όταν βρίσκεται στην υγρή μορφή του, καθώς αυτοί οι δεσμοί συγκρατούν πιο σφιχτά τα μόρια του




**α) Το νερό είναι υγρό σε θερμοκρασία δωματίου.**

**β) Το νερό είναι πολικό μόριο.**

**γ) Η υγρή φάση του νερού είναι πυκνότερη από τη στερεή φάση του (πάγος).**




**δ) Το νερό έχει υψηλή ειδική θερμότητα και αποτελεί καλό μονωτή.**

**ε) Το νερό έχει υψηλή θερμότητα εξάτμισης.**

**ΕΙΚΟΝΑ 1-1** Πέντε ασυνήθιστα χαρακτηριστικά του νερού.

νερού σε σχέση με την κανονική, επαναλαμβανόμενη διάταξη που απαντάται σε κρυστάλλους όπως ο πάγος. Εάν το νερό σε υγρή μορφή σχηματίσει την πιο κοινή στερεή μορφή του (γνωστή ως πάγος) μέσα στα κύτταρα, ο αυξημένος όγκος του νερού στην στερεά μορφή του μπορεί να σχίσει τις μεμβράνες και να προκαλέσει ρήξη των κυττάρων.

- Τέταρτον, οι εκτεταμένοι δεσμοί υδρογόνου στο νερό του επιτρέπουν να απορροφά μεγάλη ποσότητα θερμότητας πριν αλλάξει θερμοκρασία: απαιτείται μία θερμίδα θερμότητας για να θερμάνει 1 mL νερού κατά 1 °C. Ο τεχνικός όρος για αυτό είναι **ειδική θερμότητα**, και η τιμή για το νερό είναι πολύ υψηλότερη από ό,τι για τα περισσότερα άλλα υγρά. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι το νερό είναι ένας καλός μονωτής έναντι της θερμότητας που παράγεται από χημικές αντιδράσεις σε ένα κύτταρο.

- Πέμπτον, η υψηλή πολικότητα των μορίων του νερού σημαίνει επίσης ότι απαιτείται σχετικά μεγάλη ποσότητα θερμότητας για την εξάτμιση του υγρού νερού. Αυτό ονομάζεται **θερμότητα εξάτμισης**. Ορισμένοι πολυκύτταροι οργανισμοί εκμεταλλεύονται αυτήν την ιδιότητα χρησιμοποιώντας το νερό ως ψυκτικό μέσο (π.χ. ιδρώτας) ή ως μέσο μεταφοράς μορίων (π.χ. διαπνοή στα φυτά).

## Οι χημικές ιδιότητες του νερού επηρεάζουν σχεδόν όλες τις μοριακές αλληλεπιδράσεις στα κύτταρα

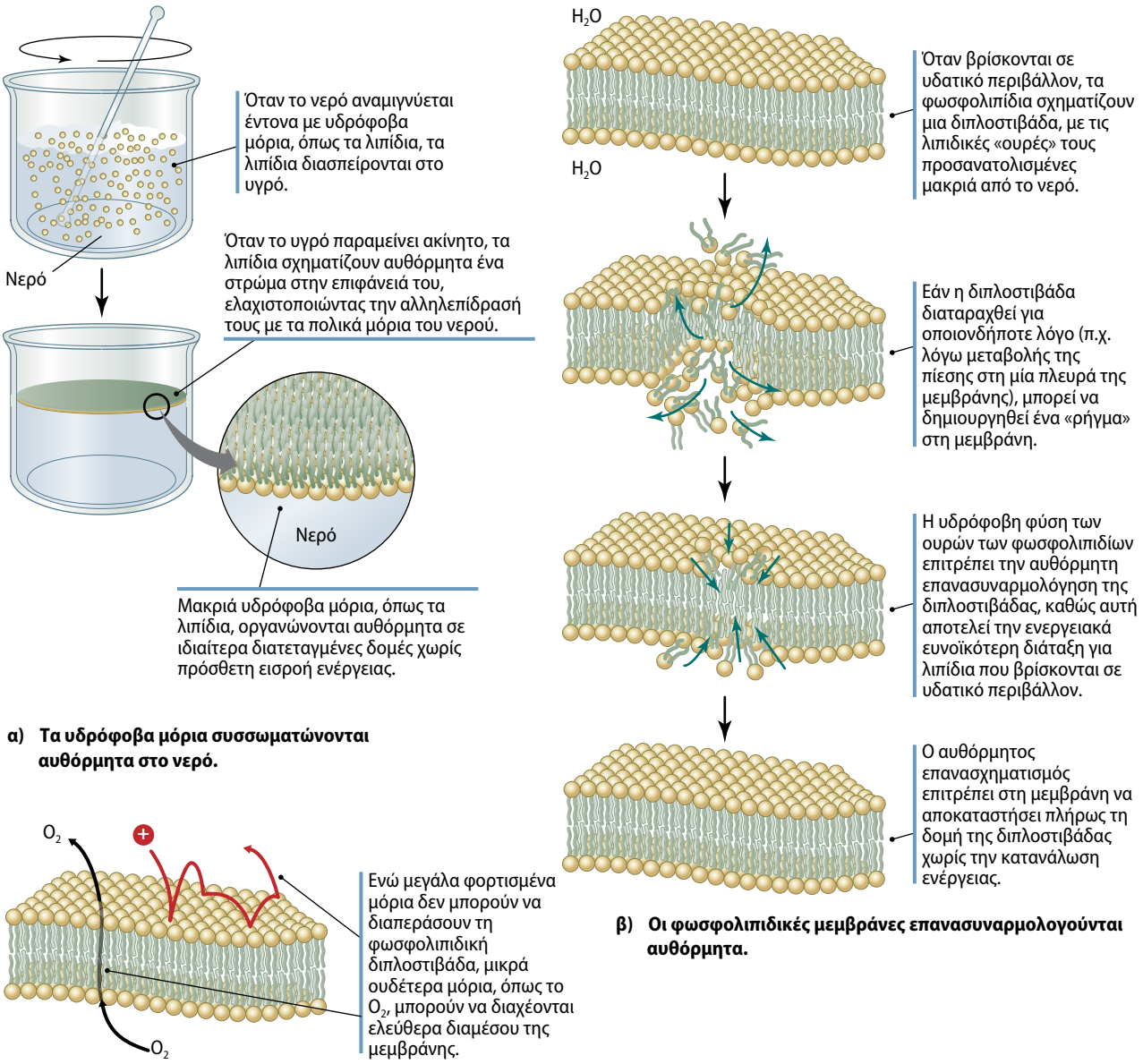
Επειδή το νερό είναι πολικό, κάθε μόριο που αλληλεπιδρά με αυτό μπορεί να ταξινομηθεί ως συμβατό (υδρόφιλο), ασύμβατο (υδρόφοβο) ή και τα δύο (αμφιπαθές). Τα υδρόφιλα μόρια περιλαμβάνουν ιόντα ($H^+$, $Na^+$, $Cl^-$ κ.τ.λ.) καθώς και άλλα πολικά μόρια (π.χ. σάκχαρα, αμμωνία). Η ανισορροπία φορτίου σε αυτές τις ενώσεις προσελκύει τα πολικά άτομα του νερού. Τα υδρόφοβα μόρια είναι μη πολικά (δεν περιέχουν φορτισμένα άτομα). Επομένως, αυτά τα μόρια δεν προσελκύουν το νερό. Τα αμφιπαθή μόρια έχουν υδρόφιλες και υδρόφοβες περιοχές. Στο νερό σε υγρή μορφή, τα αμφιπαθή μόρια διατάσσονται αυθόρμητα με ειδικούς τρόπους για να προστατεύσουν τις υδρόφοβες περιοχές από τα μόρια του νερού, ενώ οι υδρόφιλες περιοχές μεγιστοποιούν την επαφή τους με το νερό. Τα λιπίδια είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα αμφιπαθή μόρια στα κύτταρα.

Αυτή η ανάγκη απόκτησης μιας συγκεκριμένης διαμόρφωσης στο νερό καθιστά τα λιπίδια εξαιρετικά πολύτιμα για τα κύτταρα. Όπως θα δούμε κατά τη συζήτηση των βιολογικών κωδίκων αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο, για να παραμείνουν ζωντανά, τα κύτταρα χρησιμοποιούν μεμβράνες για να διαχωρίσουν τα περιεχόμενά τους από το περιβάλλον. Αυτό εξηγεί γιατί τα λιπίδια αποτελούν τα κύρια συστατικά όλων των βιολογικών μεμβρανών. Η λογική παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1-2**.

- Πρώτον, τα υδρόφοβα και τα αμφιπαθή μόρια συσσωματώνονται αυθόρμητα στο νερό. Για αυτόν τον λόγο τα λιπίδια δημιουργούν αυθόρμητα μια διπλοστιβάδα όταν βυθίζονται στο νερό. Οι ουρές λιπαρών οξέων των λιπιδίων είναι υδρόφοβες και γι' αυτό συσσωματώνονται. Εν συντομία, τα κύτταρα δεν χρειάζεται να σπαταλήσουν πολλή ενέργεια για την οργάνωση των λιπιδίων σε μεμβράνη.
- Δεύτερον, αυτή η αυθόρμητη συναρμολόγηση επιτρέπει στις μεμβράνες να επανασφραγίζονται αυτόματα σε περίπτωση διάτρησης (να θυμάστε ότι η αυτοεπιδιόρθωση είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό όλων των κυττάρων).
- Τρίτον, μια μεμβράνη που αποτελείται από λιπίδια απωθεί τα περισσότερα υδρόφιλα μόρια, δημιουργώντας έτσι έναν αποτελεσματικό φραγμό για τα υδρόφιλα μόρια μεταξύ των δύο πλευρών αυτής της μεμβράνης. Κυρίως για αυτόν τον λόγο τα κύτταρα μπορούν να δημιουργήσουν το δικό τους εσωτερικό περιβάλλον.

Η απλή έννοια της αυθόρμητης διάταξης με το νερό ισχύει για όλα τα αμφιπαθή μόρια, ακόμη και για εκείνα που προέρχονται από εξωγήινες πηγές. Οι επιστήμονες έμειναν έκπληκτοι όταν βρήκαν αμφιπαθείς ενώσεις, μεταξύ άλλων βιολογικά σημαντικών μορίων, σε έναν εξωγήινο βράχο γνωστό ως μετεωρίτη Murchison, ο οποίος έπεσε στην Αυστραλία το 1969. Αυτές οι ενώσεις είχαν το σωστό μέγεθος ώστε να σχηματίζουν βιολογικές μεμβράνες και όταν απομονώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε νερό, επανασχημάτισαν διαμερίσματα που συμπεριφέρονταν όπως οι απλές βιολογικές μεμβράνες. Πως σχηματίστηκαν; Οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι παρουσία υψηλής θερμότητας, το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας ενώσεις με έως 16 άνθρακες. Αυτές οι απλές χημικές αντιδράσεις θα μπορούσαν να έχουν συμβεί τόσο στις ηφαιστειακές συνθήκες της πρώιμης Γης όσο και κατά τη διάρκεια των μετεωριτών.

Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε τους επιστήμονες στο συμπέρασμα ότι πριν από 3,6-4,0 δισεκατομμύρια χρόνια τα «πρώτα αμφίφιλα που σχημάτισαν μεμβράνη» στη Γη σχηματίστηκαν από «γε-




**ΕΙΚΟΝΑ 1-2** Τρεις λόγοι για τους οποίους τα λιπίδια σχηματίζουν μεμβράνες στα κύτταρα.

ωχημικές πηγές, συμπεριλαμβανομένου εξωγήινου υλικού» (Fiore and Strazewski 2016). Οι χημικοί υποθέτουν ότι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι βρασμού και τήξης του νερού συγκέντρωσαν αυτά τα αμφιπαθή μόρια στην επιφάνεια υδάτινων σωμάτων (ωκεανοί, λίμνες, λιμνοθάλασσες κ.τ.λ.), σε παραλίες, ή στην άκρη υδροθερμικών πηγών. (Το 2018, οι επιστήμονες ανακάλυψαν στοιχεία για την ύπαρξη μιας μεγάλης λίμνης με νερό σε απόσταση περίπου ενός μιλίου κάτω από την επιφάνεια του Άρη, ενισχύοντας την πιθανότητα να έχουν λάβει χώρα παρόμοιες αντιδράσεις εκεί). Με την πάροδο του χρόνου, οι αμφιπαθείς ενώσεις σχημάτισαν διαμερίσματα αποτελούμενα από νερό που συγκέντρωναν βασικές μοριακές δομικές λίθους για τη ζωή, αυξάνοντας τις αλληλεπιδράσεις τους. Μερικά από αυτά τα διαμερίσματα τελικά συγχωνεύτηκαν για να σχηματίσουν τα πρώτα πρωτοκύτταρα, παρόμοια με τον τρόπο που οι σταγόνες λαδιού συνενώνονται σε ένα ποτήρι νερό. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι αυτό είναι το πρώτο συμβάν εξελικτικής επιλογής (βλ. Ένθετο 1-4) επειδή κάθε φορά που σχηματιζόταν ένα νέο μεμβρανικό δοχείο, διαφορετικοί εσωτερικοί συνδυασμοί βιολογικά σημαντικών μορίων εγκλείονταν μέσα σε αυτό. Μόνο εκείνα τα δοχεία που είχαν εγκλείσει τον νικητήριο συνδυασμό μορίων μπόρεσαν να προχωρήσουν σε νέα επίπεδα πολυπλοκότητας

### ΕΝΘΕΤΟ 1-4 ΥΠΟΔΕΙΞΗ: **Γρήγορη ανασκόπηση της Δαρβινικής εξέλιξης**

Η Δαρβινική εξέλιξη βασίζεται σε τρεις προϋποθέσεις:

1. Οι οργανισμοί που υφίστανται εξέλιξη πρέπει να διαθέτουν επαρκή δομική και λειτουργική ποικιλομορφία στον πληθυσμό τους, ώστε να διασφαλίζεται ότι δεν θα ανταποκρίνονται όλοι με τον ίδιο τρόπο στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους.

   Σημειώστε ότι οι πληθυσμοί των αμφίφιλων οργανισμών στο πρωτόγονο περιβάλλον της Γης ήταν αρκετά διαφορετικοί ώστε να πληρούν αυτή την προϋπόθεση.
2. Οι οργανισμοί πρέπει να είναι σε θέση να μεταβιβάσουν τα μεταβλητά χαρακτηριστικά τους στους απογόνους τους. Με άλλα λόγια, αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει να είναι κληρονομήσιμα.

   Επειδή τα πρωτόγονα αμφιπαθή λιπίδια αυτοσυναρμολογούνται σε υδατικό περιβάλλον, τα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους είναι κοινά σε όλες τις δομές που περιέχουν αμφιπαθή λιπίδια, συμπεριλαμβανομένων των απογόνων τους. Σημειώστε ότι οι δομές που δεν μπορούν να δημιουργήσουν αντίγραφα του εαυτού τους δεν πληρούν μια βασική προϋπόθεση για να είναι ζωντανές, επομένως μόνο τα αυτοαντιγραφόμενα πρωτοκύτταρα μπορούσαν να εξελιχθούν σε ζωντανούς οργανισμούς.
3. Ορισμένα κληρονομικά χαρακτηριστικά πρέπει να προσδίδουν ένα επιλεκτικό πλεονέκτημα σε υποομάδες οργανισμών εντός του πληθυσμού. Με την πάροδο του χρόνου, αυτά τα χαρακτηριστικά γίνονται πιο κοινά στα επιζώντα μέλη του πληθυσμού.

   Η σύνθεση του πληθυσμού πρέπει να αλλάζει με την πάροδο του χρόνου ως ανταπόκριση στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Εάν όλες οι παραλλαγές έχουν παρόμοια ανταπόκριση στις αλλαγές του περιβάλλοντος, δεν υπάρχει επιλεκτική πίεση, ο πληθυσμός παραμένει αμετάβλητος και δεν παρατηρείται εξέλιξη μέσω της φυσικής επιλογής.

ως ζωντανά κύτταρα. Η τρέχουσα ονομασία αυτού του νικητήριου οργανισμού είναι **LUCA** – ο Τελευταίος Οικουμενικός Κοινός Πρόγονος όλων των οργανισμών.

Άλλα πειράματα έδειξαν ότι κάτω από πολύ συγκεκριμένες συνθήκες, στρώματα λιπιδίων στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο, δημιουργώντας τη χαρακτηριστική «λιπιδική διπλοστιβάδα» που έχουν πλέον σχεδόν όλες οι βιολογικές μεμβράνες. Αυτό πρέπει να προσέδωσε σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των διαμερισμάτων μονής στιβάδας, καθώς όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί κληρονόμησαν αυτό το χαρακτηριστικό. Είναι εκπληκτικό ότι ολόκληρη η ακολουθία συμβάντων που οδήγησε στην εμφάνιση της ζωής στη Γη ξεκίνησε με μια απλή χημική αρχή: αμφιπαθή μόρια αυτοσυναρμολογούνται παρουσία υγρού νερού για να σχηματίσουν σταθερές δομές. Η ζωή δεν θα υπήρχε χωρίς τη δυνατότητα του νερού να επιβάλλει συναρμολόγηση.

## Οι βιολογικοί κώδικες εξηγούν τη ποικιλομορφία της ζωής

Πώς πραγματοποιήθηκε η αύξηση και η διαίρεση των πρώτων κυττάρων της Γης αμέσως μετά τη δημιουργία τους, οδηγώντας στην εμφάνιση των πληθυσμών που είναι σε θέση να υποβληθούν σε Δαρβινική εξέλιξη; Δεν υπάρχουν γνωστά φυσικά στοιχεία που εξηγούν το πώς έγινε, επομένως για να απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα, πρέπει να προτείνουμε πιθανές ερμηνείες και να ψάξουμε για ενδείξεις. Μια ομάδα ερμηνειών επικεντρώνεται στη σημασία της μεταβίβασης πληροφορίας από τη μία γενιά κυττάρων στην επόμενη, χρησιμοποιώντας κώδικες. Σκεφτείτε για λίγο πώς μεταβιβάζουμε πληροφορίες στην καθημερινή μας ζωή (βλ. Ένθετο 1-5). Για να είναι αποτελεσματική η επικοινωνία, πρέπει να κατανοούμε και να ακολουθούμε κάποιους θεμελιώδεις κανόνες: τόσο ο αποστολέας όσο και ο αποδέκτης πρέπει να έχουν κοινή γλώσσα, είτε κυριολεκτικά (π.χ. λέξεις) είτε

### ΕΝΘΕΤΟ 1-5 ΥΠΟΔΕΙΞΗ: **Ο κόσμος των κωδικών**

Για να εξοικειωθείτε καλύτερα με τη σημασία της κωδικοποιημένης επικοινωνίας στο κυτταρικό επίπεδο, σκεφτείτε πόσο σημαντικοί είναι οι κώδικες στην καθημερινή ζωή. Αυτό το βιβλίο βασίζεται στον κώδικα της γραπτής γλώσσας. Παραδείγματος χάριν, η θέση στην οποία κάθεστε στην τάξη καθορίζεται εν μέρει από τον κώδικα διάταξης των καθισμάτων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας και της μάθησης. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ότι όλες οι συζητήσεις είναι γεμάτες κώδικες που μεταδίδουν τις σκέψεις μας, ακόμη και τα συναισθήματά μας, στους άλλους. Ορισμένοι κώδικες (π.χ., το βασικό λεξιλόγιο στις γλώσσες) είναι «γενικού σκοπού», ενώ άλλοι (π.χ. οι κώδικες της κυτταρικής βιολογίας) είναι εξαιρετικά εξειδικευμένοι. Επίσης, αναλογιστείτε τι χρειάζεται για να είναι ένας κώδικας αποτελεσματικός. Ο αποστολέας και ο αποδέκτης πρέπει να διαθέτουν τη φυσική ικανότητα να παράγουν/κωδικοποιούν και να λαμβάνουν/αποκωδικοποιούν τις πληροφορίες. Για την αποτελεσματική χρήση των κωδίκων της γλώσσας, βασιζόμαστε στις αισθήσεις μας και τις κινητικές δεξιότητες της γραφής και της ανάγνωσης.

μεταφορικά (π.χ. χαμόγελο). Επίσης, ο καθένας πρέπει να διαθέτει τις απαραίτητες δομές ώστε να μπορεί να παράγει ένα σήμα και να το μεταφράζει σε κάποια ενέργεια.

Το ίδιο ισχύει για τα κύτταρα και τα μόρια από τα οποία αποτελούνται: πρέπει να είναι σε θέση να δημιουργούν και να λαμβάνουν κωδικοποιημένες πληροφορίες. Στο κυτταρικό επίπεδο, οι πρώτες πληροφορίες που ανταλλάχθηκαν ήταν οδηγίες για την αντιγραφή και τον βασικό μεταβολισμό. Καθώς τα κύτταρα έγιναν πιο πολύπλοκα και εξειδικευμένα, αυξήθηκε επίσης η ποσότητα και η πολυπλοκότητα των πληροφοριών που μπορούσαν να ανταλλάξουν (βλ. Ένθετο 1-6).

Οι βιολόγοι χρησιμοποιούν για συντομία τον όρο **βιολογία του κώδικα** για να περιγράψουν τη βιολογική βάση αυτού του τύπου μεταφοράς πληροφοριών (Barbieri 2018). Η βιολογία του κώδικα προτείνει απλά ότι οι βιολογικοί κώδικες είναι *ομάδες κανόνων* που επιτρέπουν σε ανεξάρτητες βι-

### ΕΝΘΕΤΟ 1-6 **Η αναλογία «το κύτταρο ως μια πολυσύχναστη πόλη»**

Επειδή οι περισσότεροι νέοι φοιτητές κυτταρικής βιολογίας δεν είναι εξοικειωμένοι με τα κύτταρα, θα μπορούσαν να προσπαθήσουν να σκεφτούν ένα κύτταρο ως κάτι παρόμοιο με αυτό που είναι ήδη γνωστό: μια πολυσύχναστη πόλη. Σκεφτείτε πώς θα περιγράφατε την έννοια της πόλης σε κάποιον που δεν έχει πάει (ούτε την έχει δει) ποτέ. Είναι δύσκολο έργο. Πετώντας με ελικόπτερο πάνω από μια μεγάλη, πολυσύχναστη πόλη και κοιτάζοντας προς τα κάτω, ίσως να αρχίσουμε περιγράφοντας τη γενική λειτουργία των μεγαλύτερων δομών που μπορούμε να δούμε (εργοστάσια, κτίρια γραφείων, σχολεία, δρόμους κ.τ.λ.) χωρίς να εμβαθύνουμε στον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται για να είναι η πόλη λειτουργική. Παρομοίως, θα μπορούσαμε να περιγράψουμε τη γενική έννοια των «ατόμων» στην αρχική περιγραφή μιας πόλης, αλλά σίγουρα δεν θα θέλαμε να ξεκινήσουμε περιγράφοντας κάθε άτομο σε αυτήν την πόλη. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου, επομένως, είναι: (1) να παρουσιάσει τα δομικά στοιχεία των «μεγάλων κτιρίων» (πρωτεΐνες, μεμβράνες, οργανίδια και άλλες κυτταρικές δομές), (2) να εξηγήσει πώς τα «μικρά χωριά» εξελίχθηκαν σε μεγαλύτερες πόλεις και (3) να δώσει έμφαση στη σημασία της συνεργασίας και της ομαδικής εργασίας που επιτρέπει σε ομάδες πόλεων να ακμάζουν σε μια μεγαλύτερη κοινότητα (π.χ. μια πολιτεία/επαρχία/περιοχή). Τα άλλα κεφάλαια αυτού του βιβλίου θα εξετάσουν τον τρόπο λειτουργίας αυτών των δομών μέσα σε αυτές τις πόλεις. Θα επιστρέψουμε σε αυτήν την αναλογία σε άλλα κεφάλαια και καθώς θα προσθέτουμε περισσότερες λεπτομέρειες, θα μπορούμε να ζωντανέψουμε αυτήν την πόλη/κύτταρο, με στόχο να καταλήξουμε σε μια σαφή εικόνα του πώς λειτουργούν τα κύτταρα σε μοριακό επίπεδο.

ολογικές οντότητες (π.χ. μόρια ή κύτταρα) να ανταλλάσσουν πληροφορίες. Τα κύτταρα μεταβιβάζουν αυτούς τους κώδικες από γενιά σε γενιά. Ενδεχομένως το πιο γνωστό παράδειγμα βιολογικού κώδικα είναι ο γενετικός κώδικας, ο οποίος ανακαλύφθηκε τη δεκαετία του 1960. Ο γενετικός κώδικας επιτρέπει σε ένα μόριο RNA να επικοινωνεί με τον μηχανισμό που απαιτείται για τη μετατροπή των πληροφοριών που είναι αποθηκευμένες στη γενετική αλληλουχία του σε ένα πολυμερές αμινοξέων. Ορισμένα από αυτά τα πολυμερή έγιναν αυτό που αποκαλούμε σήμερα πρωτεΐνες (Θα εξετάσουμε πως συμβαίνουν αυτές οι διεργασίες στο Κεφάλαιο 8). Οι πρωτεΐνες ανέπτυξαν τους δικούς τους κώδικες για την επικοινωνία με σάκχαρα, λιπίδια, DNA, RNA και άλλες πρωτεΐνες για τη δημιουργία ακόμη πιο πολύπλοκων δομών και ορισμένες από αυτές ανέπτυξαν τους δικούς τους κώδικες. Κατά τη διάρκεια δισεκατομμυρίων χρόνων, αυτοί οι κώδικες πολλαπλασιάστηκαν, πάντα υπό την επιλεκτική πίεση της Δαρβινικής εξέλιξης, προκειμένου να δημιουργήσουν περίπλοκα δίκτυα όπως ο ανθρώπινος εγκέφαλος και οι κώδικες που αυτός ανέπτυξε για τη γραφή και την ανάγνωση γλωσσών.

Εξετάζοντας πόσο κοινός είναι ένας συγκεκριμένος κώδικας στους ζωντανούς οργανισμούς, οι βιολόγοι μπορούν να εκτιμήσουν το πότε εμφανίστηκε. Οι βιολόγοι σήμερα πιστεύουν ότι ο παλαιότερος κοινός πρόγονός μας μάλλον είχε αναπτύξει τον γενετικό κώδικα και έναν κώδικα για τον έλεγχο του βασικού μεταβολισμού (βλ. Κεφάλαιο 10) πριν από την εμφάνιση των άλλων κωδίκων. Η βάση αυτής της πεποίθησης έγκειται στο γεγονός ότι όλοι οι γνωστοί οργανισμοί χρησιμοποιούν αυτούς τους κώδικες για τη μετατροπή της γενετικής πληροφορίας σε πρωτεΐνες και τη μετατροπή της χημικής ενέργειας στις απαραίτητες δραστηριότητες για την αυτο-αντιγραφή και την επιδιόρθωση. Ο τρόπος με τον οποίο προέκυψαν αυτοί οι κώδικες εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο έντονων συζητήσεων μεταξύ των βιολόγων. Ο πρώτος μηχανισμός που ερμήνευε αυτούς τους κώδικες πιθανότατα αποτελούνταν από μόρια RNA που μπορούσαν να καταλύουν χημικές αντιδράσεις. Ορισμένοι από αυτούς τους RNA καταλύτες, που ονομάζονται **ριβοένζυμα**, παραμένουν στους σύγχρονους οργανισμούς και εξακολουθούν να παίζουν σημαντικό ρόλο στην οικοδόμηση των πρωτεϊνών, παρόλο που οι μηχανισμοί για τη μετάφραση των γενετικών πληροφοριών σε πρωτεΐνες έχουν γίνει πιο γρήγοροι και αποδοτικοί.

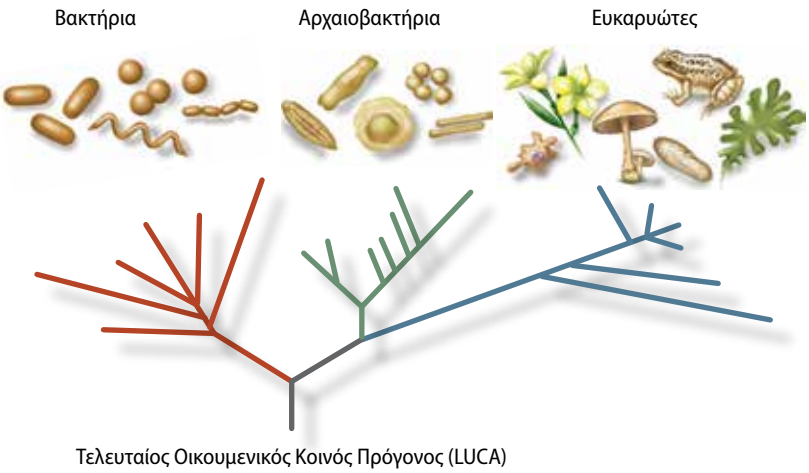
Όλοι οι οργανισμοί μοιράζονται τους ακόλουθους κώδικες και όλοι τους απαιτούν ομάδες μορίων για να μεταφράσουν τους κώδικες σε ενέργειες (βλ. Ένθετο 1-5):

- **Αποθήκευση γενετικών πληροφοριών.** Τα κύτταρα περιέχουν οδηγίες για την κατασκευή των περισσότερων βιολογικών μορίων που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της ζωής. Αυτές οι οδηγίες αποθηκεύονται με τη μορφή ενός απλού μοριακού πολυμερούς που ονομάζεται DNA.
- **Διατήρηση του εσωτερικού περιβάλλοντος.** Οι ζωντανοί οργανισμοί πρέπει να δεσμεύουν και να αποθηκεύουν ενέργεια και αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας και διατηρώντας χημική ανισορροπία με το εξωτερικό περιβάλλον. Για να παραμείνουν ζωντανά, τα κύτταρα πρέπει να προσαρμόζουν συνεχώς τις εσωτερικές δραστηριότητές τους ώστε να διατηρήσουν ένα σταθερό περιβάλλον που διαφέρει από τις συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό της κυτταρικής μεμβράνης. Η δεσμευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των χημικών συνθηκών που ευνοούν την αντιγραφή και την αυτοεπιδιόρθωση. Καθώς χρησιμοποιείται ενέργεια, απελευθερώνεται θερμότητα ως υποπροϊόν.
- **Ανίχνευση του εξωτερικού περιβάλλοντος.** Είναι σημαντικό τα κύτταρα να «αναγνωρίζουν» τις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος που μπορεί να επηρεάζουν το εσωτερικό περιβάλλον τους (π.χ. αλλαγές θερμοκρασίας, οξύτητας, επιπέδων θρεπτικών συστατικών, ωσμωτικής πίεσης). Τα κύτταρα περιέχουν αισθητήρες για σχετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αυτές, και αγνοούν τις υπόλοιπες.
- **Έλεγχος της ροής μορίων προς το εσωτερικό και το εξωτερικό του κυττάρου.** Τα κύτταρα επικοινωνούν με το εξωτερικό περιβάλλον κυρίως μέσω της επιλεκτικής μεταφοράς μορίων (π.χ. τα κύτταρα εισάγουν θρεπτικές ουσίες και αποβάλλουν άχρηστες ουσίες του μεταβολισμού). Ο

έλεγχος αυτής της διακίνησης μορίων βοηθά στη διατήρηση της χημικής ανισορροπίας στα κύτταρα και στην ανίχνευση του περιβάλλοντός τους. Η ικανότητα των ζωντανών οργανισμών να διατηρούν σταθερές τις εσωτερικές συνθήκες ονομάζεται **ομοιόσταση.**

- **Κατάλυση χημικών αντιδράσεων.** Για τη διατήρηση ενός σταθερού εσωτερικού περιβάλλοντος, τα κύτταρα πρέπει να είναι σε θέση να ελέγχουν τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό τους. Μόρια που ονομάζονται ένζυμα παίζουν σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση αυτών των αντιδράσεων.
- **Παραγωγή χρήσιμων μορφών ενέργειας.** Για την κατάλυση των περισσότερων χημικών αντιδράσεων και την εκτέλεση οποιουδήποτε έργου, τα κύτταρα πρέπει να δαπανήσουν ενέργεια. Πολλά μόρια στα κύτταρα αφιερώνονται στη δέσμευση ενέργειας από το εξωτερικό του κυττάρου (π.χ. ηλιακό φως και «τροφή») και τη μετατροπή της σε λίγες μορφές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τα κύτταρα. Ένα γνωστό παράδειγμα αξιοποιήσιμης μορφής ενέργειας είναι η τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP).
- **Σύνθεση βιολογικών μορίων.** Ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που δεσμεύεται από τα κύτταρα, χρησιμοποιείται για την κατασκευή νέων βιολογικών μορίων στο εσωτερικό των κυττάρων. Αυτά τα μόρια χρησιμεύουν στην αντικατάσταση μορίων που έχουν υποστεί βλάβη, επιτρέπουν νέες λειτουργίες στο κύτταρο ή παράγουν αρκετά αντίγραφα ενός μορίου προκειμένου να μπορέσει να αντιγραφεί το κύτταρο. Για τη δημιουργία ενός σχετικά ακριβούς αντιγράφου του, το κύτταρο πρέπει να διασφαλίσει ότι όλες οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στο DNA διαβιβάζονται στο νέο θυγατρικό κύτταρο. Τα κύτταρα διαθέτουν ομάδες μορίων που είναι υπεύθυνες για την πιστή αντιγραφή του DNA και τον σωστό διαχωρισμό του κατά τη διάρκεια της κυτταρικής διαίρεσης.
- **Ρύθμιση της ροής πληροφοριών.** Όπως οι ομάδες ανθρώπων επικοινωνούν μεταξύ τους για την εκτέλεση ενός πολύπλοκου έργου, έτσι και οι ομάδες μορίων ενός κυττάρου επικοινωνούν μεταξύ τους. Κάποια μόρια εξειδικεύονται στη μεταφορά πληροφοριών από τη μια ομάδα στην άλλη.

Η εμφάνιση νέων κωδίκων, η οποία αποκαλείται **κωδικοποίηση**, βοήθησε στην έκρηξη της ποικιλομορφίας στους ζωντανούς οργανισμούς. Παραδείγματος χάριν, οι επιστήμονες τώρα προτείνουν ότι τρεις συγκεκριμένοι κώδικες επεξεργασίας σημάτων είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία των τριών βιολογικών επικρατειών –**Αρχαιοβακτήρια**, **Βακτήρια** και **Ευκαρυώτες**– από τον LUCA (βλ. **Εικόνα 1-3**). Δύο από τις τρεις επικράτειες έχασαν την ικανότητα ανάπτυξης νέων κωδί-




**ΕΙΚΟΝΑ 1-3** Οι τρεις επικράτειες οργανισμών προέρχονται από τον Τελευταίο Οικουμενικό Κοινό Πρόγονο (LUCA) αλλά έχουν διακριτές δομικές ιδιότητες. Αυτό είναι ένα φυλογενετικό δένδρο που δείχνει την πιθανή πορεία της εξέλιξης από τον LUCA (κάτω) στους ευκαρυώτες (πάνω δεξιά).

κων, αλλά η επικράτεια των Ευκαρυωτών συνέχισε να εισάγει νέους κώδικες και επομένως ήταν σε θέση να δημιουργεί σημαντική ποικιλομορφία στους πληθυσμούς της, σε αντίθεση με τα Αρχαιοβακτήρια και τα Βακτήρια. Το γεγονός αυτό βοήθησε στην προώθηση της εξέλιξης των Ευκαρυωτών και συνέβαλε στην τεράστια ποικιλία των ευκαρυωτικών μορφών ζωής που βρίσκουμε στη Γη (βλ. Ένθετο 1-7).

### ? ΕΝΘΕΤΟ 1-7 ΣΥΧΝΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ: **Είναι οι βιολογικοί κώδικες προϊόν «έξυπνου σχεδιασμού»;**

Όχι. Να θυμάστε ότι δεν υπάρχουν πειραματικές ενδείξεις που να υποστηρίζουν ότι οι κανόνες κωδικοποίησης έχουν σχεδιαστεί, έχουν «πρόθεση» ή αντικατοπτρίζουν κάποια λογική εξήγηση. Οι βιολογικοί κώδικες προέκυψαν αυθόρμητα και υπόκεινται σε εξελικτική αλλαγή.

## Ενδείξεις για την πιθανότητα ύπαρξης εξωγήινης ζωής

Το ερώτημα εάν υπάρχει ζωή εκτός της Γης πιθανώς είναι πιο παλιό και από την ίδια την ανθρωπότητα. Μόλις πρόσφατα οι κυτταρικοί βιολόγοι μπόρεσαν να εκφέρουν γνώμη για το ερώτημα αυτό, βάσει των πειραματικών ενδείξεων. Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει απολύτως καμία πειστική, επαληθεύσιμη ένδειξη ότι υπάρχει ζωή οπουδήποτε αλλού εκτός της Γης. Αντίθετα, η συζήτηση τώρα επικεντρώνεται στην *πιθανότητα* να υπάρχει ζωή κάπου αλλού. Αυτή η αντιπαράθεση οδήγησε στην εμφάνιση ενός νέου κλάδου της βιολογίας τον εικοστό αιώνα που ονομάζεται αστροβιολογία. Βάσει των αποδεικτικών στοιχείων που έχουν περιγραφεί μέχρι τώρα σε αυτό το κεφάλαιο, η πιθανότητα ύπαρξης εξωγήινης ζωής στηρίζεται σε ορισμένες πολύ απλές απαιτήσεις: (1) μια πηγή άνθρακα, (2) νερό σε υγρή μορφή, (3) μια πηγή ενέργειας με ικανότητα κατάλυσης του πολυμερισμού του άνθρακα και (4) βιολογικούς κώδικες που επιτρέπουν σε αυτά τα βασιζόμενα σε άνθρακα πολυμερή να αυτο-αντιγράφονται, να επιδιορθώνονται και να δεσμεύουν ενέργεια από το περιβάλλον.

Συνεχώς συσσωρεύονται αποδεικτικά στοιχεία σχετικά με την εξωγήινη ζωή. Οι πρόσφατες εξελίξεις σε τεχνολογίες που μπορούν να βρουν πλανήτες εκτός του ηλιακού μας συστήματος έχουν επίσης επιτρέψει στους φυσικούς να αναζητήσουν ενδείξεις για την ύπαρξη πιθανής ζωής. Ο άνθρακας και το νερό βρίσκονται σε αφθονία σε όλο το σύμπαν και έχουν ανιχνευθεί σε πλανήτες, φεγγάρια, μετεωρίτες και μικρότερες δομές που ονομάζονται αστροφυσικοί πάγοι. Μια μελέτη του 2017 αναπαρήγαγε τις συνθήκες στους αστροφυσικούς πάγους και τους εξέθεσε σε ηλεκτρόνια που παράγονται όταν η ύλη βάλλεται από υψηλής ενέργειας ακτινοβολία στο διάστημα, όπως το υπεριώδες φως, οι κοσμικές ακτίνες και άλλα φορτισμένα σωματίδια. Σε μια μελέτη, αυτά τα ηλεκτρόνια παρείχαν αρκετή ενέργεια για την κατάλυση του σχηματισμού πολυμερών άνθρακα, των βασικών δομικών λίθων της ζωής (Esmaili et al. 2017). Άλλες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι ορισμένοι μετεωρίτες που πέφτουν στην επιφάνεια της Γης περιέχουν κάποιες από τις απλές μοριακές δομικές λίθους που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη της ζωής. Δεν υπάρχουν, βεβαίως, αποδεικτικά στοιχεία για την ύπαρξη βιολογικών κωδίκων στην εξωγήινη ύλη, παρόλο που το γεγονός ότι οι οργανικές ενώσεις που εντοπίστηκαν στον μετεωρίτη Murchison μπορούν να αυτοσυναρμολογηθούν στο νερό αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο να υπάρχουν κώδικες απαραίτητοι για τη ζωή σε άλλα μέρη του σύμπαντος.

Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν ότι επειδή η ζωή προήλθε από απλές μοριακές δομικές λίθους που απαντώνται σε όλο το σύμπαν, η ζωή στη Γη ενδέχεται να προήλθε μόνο αφού εμφανίστηκαν οι απαραίτητοι βιολογικοί κώδικες που θα εξασφάλιζαν την ανταλλαγή πληροφοριών. Εναλλακτικά, επειδή αυτοί οι κώδικες εμφανίζονται αυθόρμητα, είναι πιθανό να υπάρχει ζωή όπου λειτουργούν αυτοί οι κώδικες, συμπεριλαμβανομένων των εξωγήινων περιοχών. Ο τομέας της αστροβιολογίας

είναι αφιερωμένος στην επίλυση αυτού του αιώνιου γρίφου. (Για να μάθετε περισσότερα για αυτόν τον τομέα, ανατρέξτε στην ιστοσελίδα https://astrobiology.nasa.gov).

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΝΟΙΑΣ 1

Εκτός από τις ενώσεις άνθρακα, ποια είναι τα άλλα τρία απαραίτητα συστατικά για τη δημιουργία ζωής; Ως υπόδειξη, σκεφτείτε τι χρειάζεται για τη δημιουργία και τη διάσπαση των δεσμών μεταξύ των ατόμων του άνθρακα, τι χρειάζεται για τη διαμερισματοποίηση αυτών των χημικών αντιδράσεων και τι επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ ομάδων μορίων.

## 1.3 Όλα τα κύτταρα είναι φτιαγμένα από τις ίδιες κοινές μοριακές δομικές λίθους

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Η σχέση δομής-λειτουργίας είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την κατανόηση της κυτταρικής οργάνωσης.
- Η μελέτη της κυτταρικής χημείας ξεκινάει με την εξέταση του ατόμου του άνθρακα.
- Τα λιπίδια, τα σάκχαρα, τα αμινοξέα και τα νουκλεϊκά οξέα είναι τα πιο κοινά βιομόρια στα κύτταρα.
- Τα σάκχαρα είναι απλοί υδατάνθρακες.
- Τα αμινοξέα σχηματίζουν μόρια πλούσια σε άνθρακα που περιέχουν μια αμινομάδα και μια καρβοξυλική ομάδα.

Στο μεγαλύτερο μέρος του βιβλίου που ακολουθεί εξετάζουμε τα μέλη των ομάδων μορίων εντός ενός κυττάρου, τους ρόλους τους και τον τρόπο με τον οποίο εκτελούν το έργο τους. Θα καθοδηγηθούμε από ένα εντυπωσιακό παράδειγμα της βιολογίας που ονομάζεται **σχέση δομής-λειτουργίας**. Η κεντρική αρχή της σχέσης δομής-λειτουργίας είναι ότι η *λειτουργία* οποιασδήποτε βιολογικής οντότητας (από ένα μεμονωμένο μόριο έως ένα τεράστιο οικοσύστημα) μπορεί να προσδιοριστεί από την κατανόηση της *δομής* της. Μέσω αυτής της ιδέας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι καθώς αυξάνεται η δομική ποικιλομορφία, αυξάνεται και το εύρος των λειτουργιών. Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση δομής-λειτουργίας για να καταλάβουμε πώς λειτουργούν τα κύτταρα, αλλά για να το κάνουμε αυτό, πρέπει να έχουμε κατανοήσει καλά τις χημικές αρχές που διέπουν τη μοριακή δομή (βλ. Ένθετα 1-8 και 1-9). Μπορούμε να μάθουμε πολλά με

### ΕΝΘΕΤΟ 1-8 ΥΠΟΔΕΙΞΗ: Ξεπερνώντας το εμπόδιο της ορολογίας

Ένα μεγάλο μέρος αυτού του κεφαλαίου ασχολείται με τις χημικές αρχές που διέπουν τη δομή και τη λειτουργία των κυττάρων και εισάγει πολλούς εξειδικευμένους όρους. Τα πεδία της βιολογίας και της χημείας έχουν τη δική τους ορολογία, και αυτοί οι όροι συχνά δυσκολεύουν τους φοιτητές να κατανοήσουν τις σχέσεις μεταξύ των βασικών εννοιών. Ακολουθεί μια συμβουλή: οι φοιτητές πρέπει να είναι σε θέση να εξηγήσουν τις σχέσεις που αναφέρονται εδώ με δικές τους λέξεις πριν αρχίσουν να απομνημονεύουν την ορολογία. Όταν η υποκείμενη έννοια είναι ασαφής, είναι συχνά δύσκολο να θυμηθεί κανείς συγκεκριμένες λέξεις και ο τεράστιος αριθμός τεχνικών όρων που χρησιμοποιούν οι βιολόγοι θα κατακλύσει τη βραχυπρόθεσμη μνήμη ακόμη και των καλύτερων φοιτητών. Η *έννοια πριν από το λεξιλόγιο* είναι μια καλή συνήθεια που πρέπει να υιοθετήσετε σε αυτόν τον τομέα.

### ΕΝΘΕΤΟ 1-9 ΣΥΧΝΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ: **Πόση χημεία πρέπει να γνωρίζω για να κατανοήσω τα θέματα αυτού του βιβλίου;**

Το κεφάλαιο αυτό περιέχει μια σχετικά μικρή σύνοψη ενός ευρέος φάσματος χημικών αρχών, συμπεριλαμβανομένων θεμάτων που συχνά καλύπτονται σε μαθήματα οργανικής χημείας. Αυτή η προσέγγιση έχει σχεδιαστεί για να βοηθήσει τους φοιτητές που έχουν εμπειρία στην οργανική χημεία να εφαρμόσουν τις γνώσεις τους σε θέματα κυτταρικής βιολογίας, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι οι φοιτητές πρέπει να γνωρίζουν καλά οργανική χημεία για να μάθουν από αυτό το βιβλίο. Στην πραγματικότητα, κάποιος μπορεί να μελετήσει μεγάλο μέρος της κυτταρικής βιολογίας με βασική κατανόηση της χημείας στο επίπεδο που καλύπτεται στα εισαγωγικά μαθήματα γενικής χημείας στο πανεπιστήμιο. Εάν οι φοιτητές έχουν οποιεσδήποτε ανησυχίες σχετικά με το επίπεδο χημείας που απαιτείται στο μάθημά τους, θα πρέπει να επικοινωνήσουν με τον διδάσκοντα.

την απλή εξέταση των πιο συνηθισμένων μελών των κυτταρικών ομάδων και του τρόπου δημιουργίας τους.

## Η μελέτη της κυτταρικής χημείας ξεκινάει με την εξέταση του ατόμου του άνθρακα

Ο άνθρακας είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό στοιχείο των κυττάρων, για τρεις λόγους:

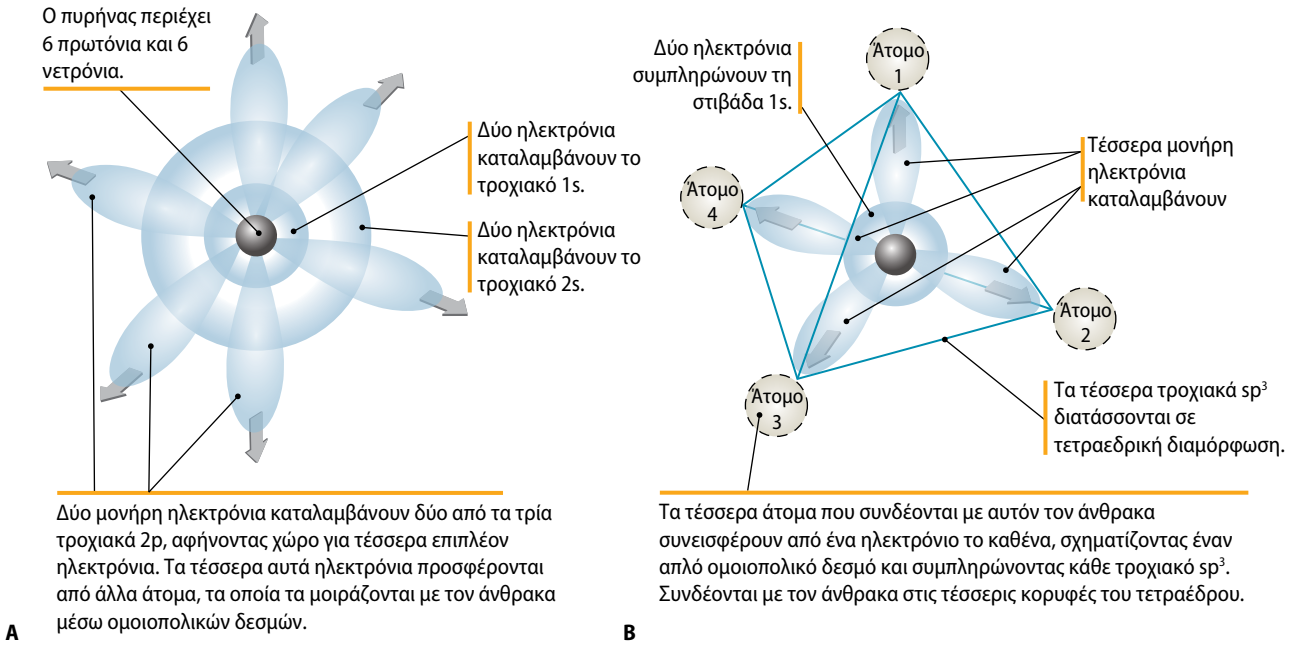
1. Εκτός από το νερό, οι ενώσεις που περιέχουν άνθρακα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αφθονία από όλα τα γνωστά μόρια. Εκείνα που περιέχουν άνθρακα υπερέχουν αριθμητικά έναντι όλων των υπολοίπων μορίων μαζί.
2. Αυτές οι ενώσεις βρίσκονται σε μια μεγάλη ποικιλία παραλλαγών.
3. Τα άτομα του άνθρακα μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους πιο εύκολα από τα άτομα οποιουδήποτε άλλου στοιχείου, οδηγώντας σε μόρια τεράστιου μεγέθους (ορισμένα περιέχουν αρκετές χιλιάδες άτομα άνθρακα) και δομικής πολυπλοκότητας.

Επομένως, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι οι οργανισμοί συχνά αναφέρονται ως μορφές ζωής με βάση τον άνθρακα.

### Ο άνθρακας σχηματίζει χαρακτηριστικούς δεσμούς με το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο και άλλους άνθρακες

Ο αριθμός των ενώσεων που περιέχουν άνθρακα είναι τόσο μεγάλος που ταξινομούνται σε ομάδες (ή οικογένειες) σύμφωνα με τη δομή τους. Θα εξετάσουμε πιο προσεκτικά κάποιες από αυτές τις ομάδες αργότερα, αλλά πρώτα, πρέπει να αναγνωρίσουμε μια σημαντική έννοια: ότι παρά την τεράστια πολυπλοκότητά τους, οι ενώσεις που περιέχουν άνθρακα συνήθως κατασκευάζονται από έναν μικρό αριθμό βασικών χημικών σχημάτων. Στα κύτταρα, τα άτομα του άνθρακα συνήθως συνδέονται ομοιοπολικά σε μόνο τέσσερα άλλα άτομα: υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο και άλλους άνθρακες. Οι περισσότερες ενώσεις με βάση τον άνθρακα στα κύτταρα αποτελούνται από αυτές τις απλές δομές.

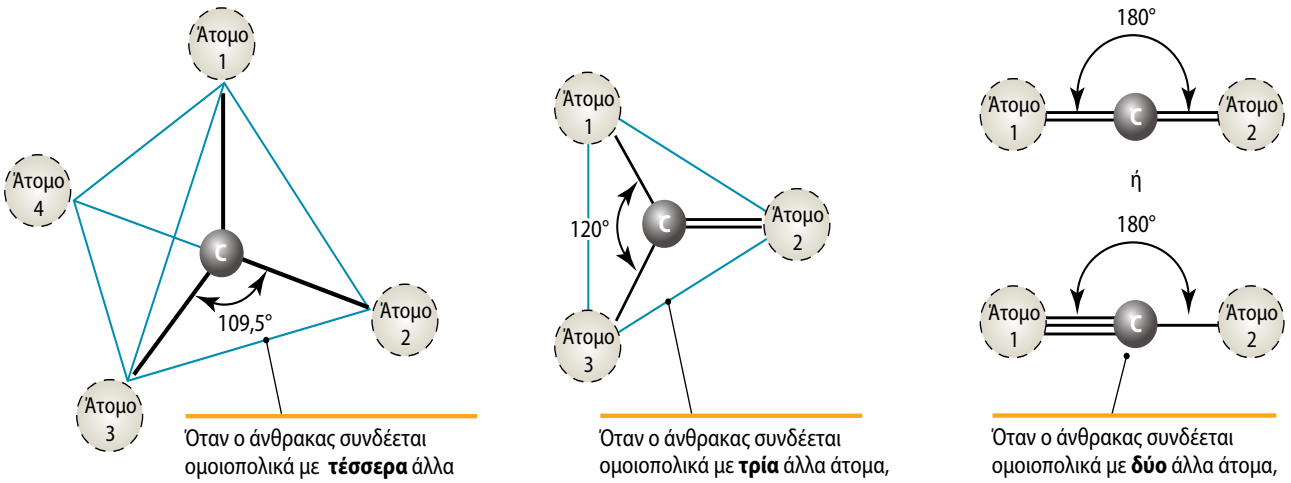
Για όσους ενδιαφέρονται για λεπτομέρειες, ας εξετάσουμε αυτά τα δομικά στοιχεία άνθρακα πιο προσεκτικά (όπως είδαμε στο Ένθετο 1-9, οι αναγνώστες ενθαρρύνονται να ρωτήσουν τον καθηγητή τους αν αυτό το υλικό είναι νέο. Κάποια μαθήματα μπορεί να μην απαιτούν αυτό το επίπεδο λεπτομερειών). Επειδή κάθε δομικό στοιχείο περιέχει τουλάχιστον έναν άνθρακα, πρέπει να κατανοήσουμε τον τρόπο δημιουργίας των ομοιοπολικών δεσμών με άτομα άνθρακα. Το άτομο του άνθρακα περιέχει έξι ηλεκτρόνια, διατεταγμένα σε τρεις τροχιακές διαμορφώσεις, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-4**. Δύο ηλεκτρόνια βρίσκονται στο τροχιακό 1s (η εσώτατη στιβάδα), συμπληρώνοντάς το. Τα υπόλοιπα τέσσερα εντοπίζονται στη δεύτερη (σθένους, ή εξωτερική) στιβάδα: δύο βρίσκο-




**ΕΙΚΟΝΑ 1-4** **(A)** Μοντέλο ενός ατόμου άνθρακα. **(B)** Μοντέλο ενός ατόμου άνθρακα δεσμευμένου σε τέσσερα άλλα άτομα.

νται στο τροχιακό 2s και σε ένα μοναδικό (μη δεσμευμένο) άτομο άνθρακα. Τα άλλα δύο δεν είναι ζευγαρωμένα και καταλαμβάνουν δύο από τα τρία τροχιακά 2p, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-4Α**. Στη χημεία, ο **κανόνας της οκτάδας** δηλώνει ότι *μη μεταλλικά άτομα τείνουν να προσλαμβάνουν, να χάνουν ή να μοιράζονται ηλεκτρόνια έως ότου περιβληθούν από οκτώ ηλεκτρόνια σθένους*. Επειδή ο άνθρακας έχει μόνο τέσσερα ηλεκτρόνια στη στιβάδα σθένους του, «χρειάζεται» τέσσερα επιπλέον ηλεκτρόνια. Συμπληρώνει τις υπόλοιπες θέσεις στα δύο τροχιακά 2p σχηματίζοντας τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με άλλα άτομα. Αυτό οδηγεί σε μια αναδιάταξη της στιβάδας σθένους, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-4Β**: ένα ηλεκτρόνιο της στιβάδας 2s «δανείζεται» από τα τροχιακά 2p, οδηγώντας στον σχηματισμό τεσσάρων τροχιακών που ονομάζονται υβριδικά τροχιακά $sp^3$.

Αυτοί οι τέσσερις δεσμοί αποκτούν χαρακτηριστικό σχήμα για κάθε διαμόρφωση, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-5**. Όταν ο άνθρακας συνδέεται σε άλλα τέσσερα άτομα, αυτοί οι τέσσερις δεσμοί διατάσσονται σε τετραεδρική διαμόρφωση, με γωνίες δεσμού 109,5°. Όταν ο άνθρακας συνδέεται




**ΕΙΚΟΝΑ 1-5** Ο προσανατολισμός των ομοιοπολικών δεσμών που σχηματίζονται από τον άνθρακα.

### ΕΝΘΕΤΟ 1-10 **Το πυρίτιο ως πιθανό υποκατάστατο του άνθρακα στους ζωντανούς οργανισμούς**

Όπως ο άνθρακας, το πυρίτιο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική τροχιακή στιβάδα του. Το πυρίτιο είναι επίσης το δεύτερο πιο συχνό στοιχείο στη Γη, εγείροντας το ερώτημα εάν θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως «υποκατάστατο» του άνθρακα στις οργανικές ενώσεις. Το 2016, μια ομάδα ερευνητών εισήγαγαν μεταλλάξεις σε ένα βακτήριο που είχαν συλλέξει από μια υποθαλάσσια θερμή πηγή στην Ισλανδία για να αντικαταστήσουν έναν άνθρακα με ένα άτομο πυριτίου σε μια πρωτεΐνη, που ονομάζεται κυτόχρωμα c. Αυτό οδήγησε σε αύξηση της δραστηριότητας της πρωτεΐνης κατά δεκαπέντε φορές. Αν και δεν έχουν βρεθεί δεσμοί άνθρακα-πυριτίου στη φύση, τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος υποδεικνύουν ότι μια τέτοια διάταξη είναι πιθανή και μπορεί να είναι επωφελής για ορισμένους οργανισμούς.

Τροποποιημένο από Kan, S.B.J. et al. Directed evolution of cytochrome c for carbon–silicon bond formation: Bringing silicon to life. *Science*, 2016:354 (6315), 1048–1051 DOI: 10.1126/science.aah6219.

σε άλλα τρία άτομα, ένα από αυτά τα άτομα σχηματίζει έναν διπλό δεσμό, που ωθεί τα άλλα δύο άτομα σε τριγωνική, επίπεδη διαμόρφωση. Όταν ο άνθρακας συνδέεται σε άλλα δύο άτομα, τα τρία άτομα αποκτούν γραμμική διάταξη. Ο άνθρακας μπορεί να συνδέεται σε δύο άτομα μέσω ενός ζεύγους διπλών δεσμών (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα) ή μέσω ενός τριπλού δεσμού και ενός απλού δεσμού (π.χ. κυανίδιο). Ο άνθρακας δεν σχηματίζει τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με ένα μόνο άτομο.

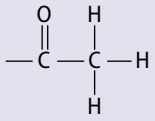
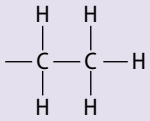
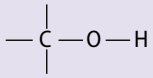
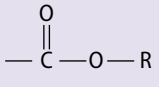
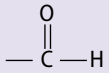
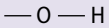
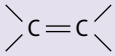
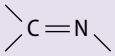
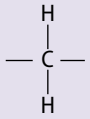
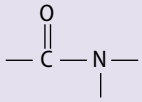
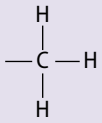
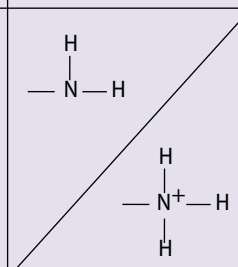
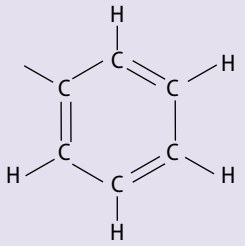
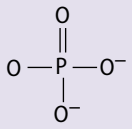
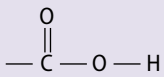
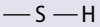
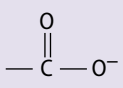
## Τα πολύπλοκα βιομόρια αποτελούνται κυρίως από χημικά δομικά στοιχεία που ονομάζονται λειτουργικές ομάδες

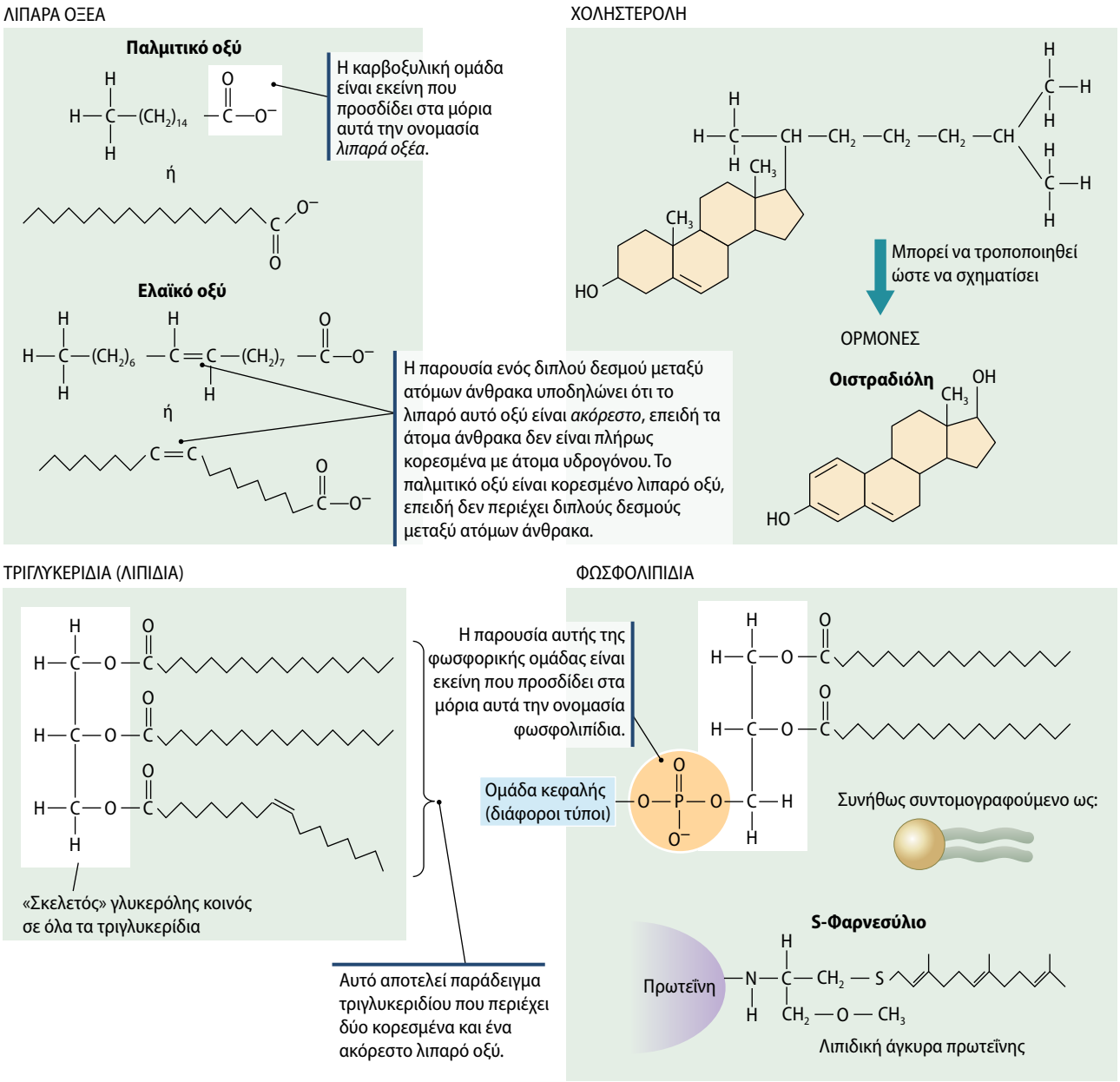
Επειδή ο άνθρακας συνδέεται πάντα σε τουλάχιστον δύο άλλα άτομα, αυτά τα άτομα και τα χημικά στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε αυτά μπορούν εύκολα να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν μια μεγάλη ποικιλία δομών. Ο τομέας της οργανικής χημείας, ο οποίος ασχολείται με τη μελέτη των ενώσεων που περιέχουν άνθρακα στους οργανισμούς, ταξινομεί τις ενώσεις αυτές ανάλογα με τη χημική τους δομή (βλ. Ένθετο 1-11). Οι διαφορετικές κατηγορίες ονομάζονται **λειτουργικές ομάδες**. Ο **Πίνακας 1-1** παραθέτει ορισμένες από τις πιο κοινές λειτουργικές ομάδες που θα συ-

### ΕΝΘΕΤΟ 1-11 ΥΠΟΔΕΙΞΗ: **Κατανόηση των διαγραμμάτων της μοριακής δομής**

Τα περισσότερα από τα διαγράμματα που χρησιμοποιούν οι βιολόγοι και οι χημικοί για την απεικόνιση των μοριακών δομών είναι συντομευμένες απλουστεύσεις των πραγματικών τρισδιάστατων δομών. Για παράδειγμα, οι τέσσερις δεσμοί ενός ατόμου άνθρακα συχνά σχεδιάζονται με προσανατολισμό πάνω-κάτω/αριστερά-δεξιά, παρόλο που γνωρίζουμε ότι οι δεσμοί δεν έχουν ποτέ γωνία 90° μεταξύ τους. Σε άλλες περιπτώσεις, οι δεσμοί δεν σχεδιάζονται καθόλου: για την ομάδα μεθυλίου συχνά χρησιμοποιείται η συντόμευση $-CH_3$. Σε άλλες περιπτώσεις, λείπουν ακόμη και γράμματα. Στις περισσότερες απεικονίσεις μεγάλων οργανικών μορίων όπως τα λιπίδια, χρησιμοποιούνται απλές γραμμές για την αναπαράσταση των δεσμών μεταξύ των ανθράκων και οι δεσμοί άνθρακα-υδρογόνου δεν περιλαμβάνονται καθόλου. Επομένως, μια γραμμή ζιγκ-ζαγκ μπορεί να αντιπροσωπεύει μια σειρά ομάδων αλκυλίου ($-CH_2-$). Στην κυτταρική βιολογία υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη συντομογραφιών χημικών δομών, αλλά μην αφήσετε αυτό να σας μπερδέψει. Μια αλκυλομάδα είναι πάντα αλκυλομάδα, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο είναι σχεδιασμένη.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1 Κοινές λειτουργικές ομάδες των βιολογικών μορίων. Σε αυτή τη συνοπτική εκδοχή της χημικής δομής, οι γωνίες των χημικών δεσμών για τα περισσότερα άτομα παραλείπονται και τα άτομα τοποθετούνται, συνήθως, σε ορθές γωνίες**

| Λειτουργική Ομάδα | Δομή | Λειτουργική Ομάδα | Δομή |
|---|---|---|---|
| Ακετύλιο |  | Αιθύλιο |  |
| Alcohol |  | Εστέρας |  |
| Αλδεΰδη |  | Υδροξύλιο |  |
| Αλκενύλιο |  | Ιμινομάδα |  |
| Αλκύλιο |  | Κετόνη |  |
| Αμίδιο |  | Μεθύλιο |  |
| Αμινομάδα |  | Φαινύλιο |  |
| Καρβονυλομάδα |  | Φωσφορικό |  |
| Καρβοξυλικό οξύ (καρβοξύλιο) |  | Θειοαιθέρας/ Σουλφυδρυλομάδα |  |
| Καρβοξυλικό ανιόν |  | Δισουλφίδιο |  |
| Αιθέρας |  | | |




**ΕΙΚΟΝΑ 1-6** Κοινοί τύποι λιπιδίων στα κύτταρα. Εμφανίζονται οι συνήθεις συντομογραφίες των οργανικών δομών.

ναντήσουμε στο βιβλίο. Σημειώστε ότι, αν και δεν περιέχουν όλες οι λειτουργικές ομάδες άτομα άνθρακα, εκείνες που περιέχουν είναι οι πλέον άφθονες στα κύτταρα.

## Τα λιπίδια είναι πολυμερή πλούσια σε άνθρακα που είναι αδιάλυτα στο νερό

Όταν ο άνθρακας σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς με το οξυγόνο ή το άζωτο, αυτοί οι δεσμοί ταξινομούνται ως πολικοί (το οξυγόνο και το άζωτο είναι πιο ηλεκτραρνητικά από τον άνθρακα). Αντίθετα, οι δεσμοί άνθρακα-άνθρακα είναι μη πολικοί, και οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ άνθρακα και υδρογόνου έχουν τόσο μικρή πολικότητα που τα μόρια που αποτελούνται μόνο από άνθρακα και υδρογόνο δεν προσελκύουν το νερό. Αυτές οι ενώσεις, που συχνά αποκαλούνται υδρογονάνθρακες, είναι υδρόφοβες και δεν διαλύονται στο νερό.

Τα **λιπίδια** είναι μια κατηγορία υδρογονανθράκων που βρίσκονται συνήθως στα κύτταρα και περιλαμβάνουν συστατικά των μεμβρανών. Η παρουσία οξυγόνου στα λιπίδια τα καθιστά ελαφρώς υδρόφιλα. Η **Εικόνα 1-6** δείχνει τις γενικευμένες δομές ορισμένων κοινών κυτταρικών λιπιδίων (βλ.

Ένθετο 1-11). Τα περισσότερα λιπίδια είναι αδιάλυτα στο υδατικό περιβάλλον του κυτοσολίου και σχηματίζουν συσσωματώματα στα κύτταρα, συμπεριλαμβανομένων των μεμβρανών. Πολλά λιπίδια στα κύτταρα συνδέονται σε υδρόφιλες λειτουργικές ομάδες όπως οι φωσφορικές ή οι ομάδες υδροξυλίου, οι οποίες προσδίδουν κάποιο βαθμό υδατοδιαλυτότητας.

Στα κοινά τροποποιημένα λιπίδια περιλαμβάνονται τα εξής:

- **Φωσφολιπίδια**. Τα φωσφολιπίδια είναι μακράν η πιο κοινή μορφή τροποποιημένων λιπιδίων στα κύτταρα. Απαρτίζουν το μεγαλύτερο μέρος των κυτταρικών μεμβρανών, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 4.
- **Στερόλες**. Η χοληστερόλη είναι ένα απαραίτητο συστατικό των ζωικών κυτταρικών μεμβρανών. Επειδή είναι κατά κύριο λόγο υδρόφοβη, η χοληστερόλη απαντάται συνήθως στη μεσαία (υδρόφοβη) ζώνη των μεμβρανών, όπου αλληλεπιδρά με φωσφολιπίδια μεταβάλλοντας τις μηχανικές ιδιότητες της μεμβράνης. Σε κάποια ζώα, παράγωγα της χοληστερόλης χρησιμοποιούνται ως ορμόνες που κυκλοφορούν στον οργανισμό επιτρέποντας την επικοινωνία μεταξύ ακόμη και πολύ απομακρυσμένων κυττάρων.
- **Τριγλυκερίδια**, γνωστά ως **λίπη** ή **έλαια**. Τα τριγλυκερίδια αποτελούν μια σημαντική μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Επειδή είναι κατά κύριο λόγο αδιάλυτα στο νερό, σχηματίζουν διακριτές σταγόνες οι οποίες, σε ορισμένα κύτταρα, είναι εύκολο να παρατηρηθούν στο μικροσκόπιο. Συχνά, τα τριγλυκερίδια μεταφέρονται μέσω του κυκλοφορικού συστήματος, δεσμευμένα σε πρωτεΐνες σχηματίζοντας μια **λιποπρωτεΐνη**.

Κάποια λιπίδια συνδέονται μόνιμα σε πρωτεΐνες, όπου παίζουν σημαντικό ρόλο στη στόχευση αυτών των πρωτεϊνών στις κυτταρικές μεμβράνες. Αυτές οι δομές ορισμένες φορές αναφέρονται ως λιπιδικές ουρές και λειτουργούν σαν άγκυρα, μέσω της αλληλεπίδρασής τους με την υδρόφοβη περιοχή της μεμβράνης, για τη διατήρηση της πρωτεΐνης στη θέση της. Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει τις λιπιδικές ουρές στις μεμβρανικές πρωτεΐνες.

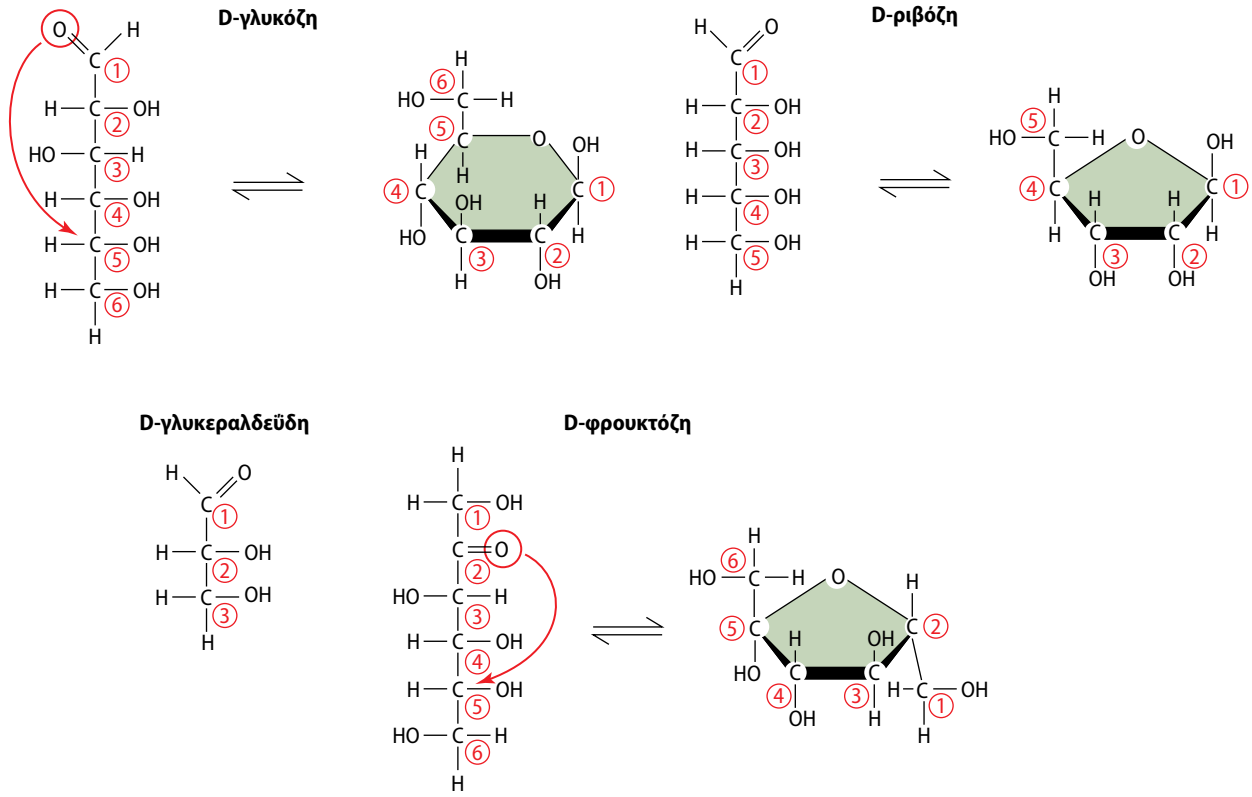
## Τα σάκχαρα είναι απλοί υδατάνθρακες

Πολλά μόρια στα κύτταρα αποτελούνται εξολοκλήρου από άνθρακα, υδρογόνο και οξυγόνο και συχνά, αυτά τα άτομα απαντώνται σε αναλογία $C_nH_{2n}O_n$. Οι χημικοί που χαρακτήρισαν για πρώτη φορά αυτές τις ενώσεις υπέθεσαν ότι διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα άτομα του άνθρακα να είναι συνδεδεμένα σε μόρια νερού και επομένως αναφέρονταν σε αυτές ως υδατάνθρακες (σήμερα γνωρίζουμε ότι δεν είναι αυτή η διάταξη αυτών των ενώσεων, αλλά το όνομα παρέμεινε). Οι υδατάνθρακες συνήθως σχηματίζουν δακτυλίους ή γραμμικές αλυσίδες συνδεδεμένων ατόμων άνθρακα. Τα άτομα του οξυγόνου και του υδρογόνου απαντώνται στις λειτουργικές ομάδες (με ονόματα όπως υδροξυλικές ομάδες, καρβονυλικές ομάδες, αλδεΰδες, αλκάνια κ.τ.λ.) που σχηματίζονται από τους άνθρακες.

Τα **σάκχαρα**, τα οποία απεικονίζονται στην **Εικόνα 1-7**, είναι κοινοί υδατάνθρακες που απαντώνται στα κύτταρα (για εκείνους που ενδιαφέρονται για τους τεχνικούς όρους που χρησιμοποιούν οι οργανικοί χημικοί για την περιγραφή τους, ένας άνθρακας σχηματίζει μια ομάδα *καρβονυλίου*, η οποία υφίσταται είτε ως *αλδεΰδη* είτε ως *κετόνη και* οι υπόλοιποι άνθρακες συνδέονται σε ομάδες *υδροξυλίου*). Τα σημαντικότερα σάκχαρα στον κυτταρικό μεταβολισμό περιέχουν τρεις έως επτά άνθρακες.

### Τα κοινά σάκχαρα γλυκόζη και ριβόζη έχουν διαφορετικές λειτουργίες στα κύτταρα

Για πολλούς φοιτητές, η αναφορά στα σάκχαρα φέρνει αμέσως στο μυαλό το σημαντικό ρόλο τους ως πηγή μεταβολικής ενέργειας. Αλλά τα σάκχαρα είναι πολύ περισσότερο από φαγητό.




**ΕΙΚΟΝΑ 1-7** Κοινοί μονοσακχαρίτες στα κύτταρα. Οι άνθρακες αριθμούνται σύμφωνα με τη καθιερωμένη πρακτική, όπως φαίνεται.

Για παράδειγμα, η **ριβόζη** είναι ένα σάκχαρο πέντε ατόμων άνθρακα που απαντάται σε όλα τα κύτταρα. Η ριβόζη και το παράγωγό της, γνωστό ως **δεοξυριβόζη**, σχηματίζουν τη ραχοκοκαλιά των νουκλεϊκών οξέων RNA και DNA, αντίστοιχα. Θα εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τα νουκλεϊκά οξέα στα Κεφάλαια 2, 7 και 12. Η **γλυκόζη** είναι ένα σάκχαρο έξι ατόμων άνθρακα που λειτουργεί ως δομικό στοιχείο πολύπλοκων μορίων όπως το άμυλο, η κυτταρίνη (ένα σημαντικό συστατικό του κυτταρικού τοιχώματος στα φυτά) και η χιτίνη (βρίσκεται στον εξωσκελετό των αρθροπόδων και στα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων).

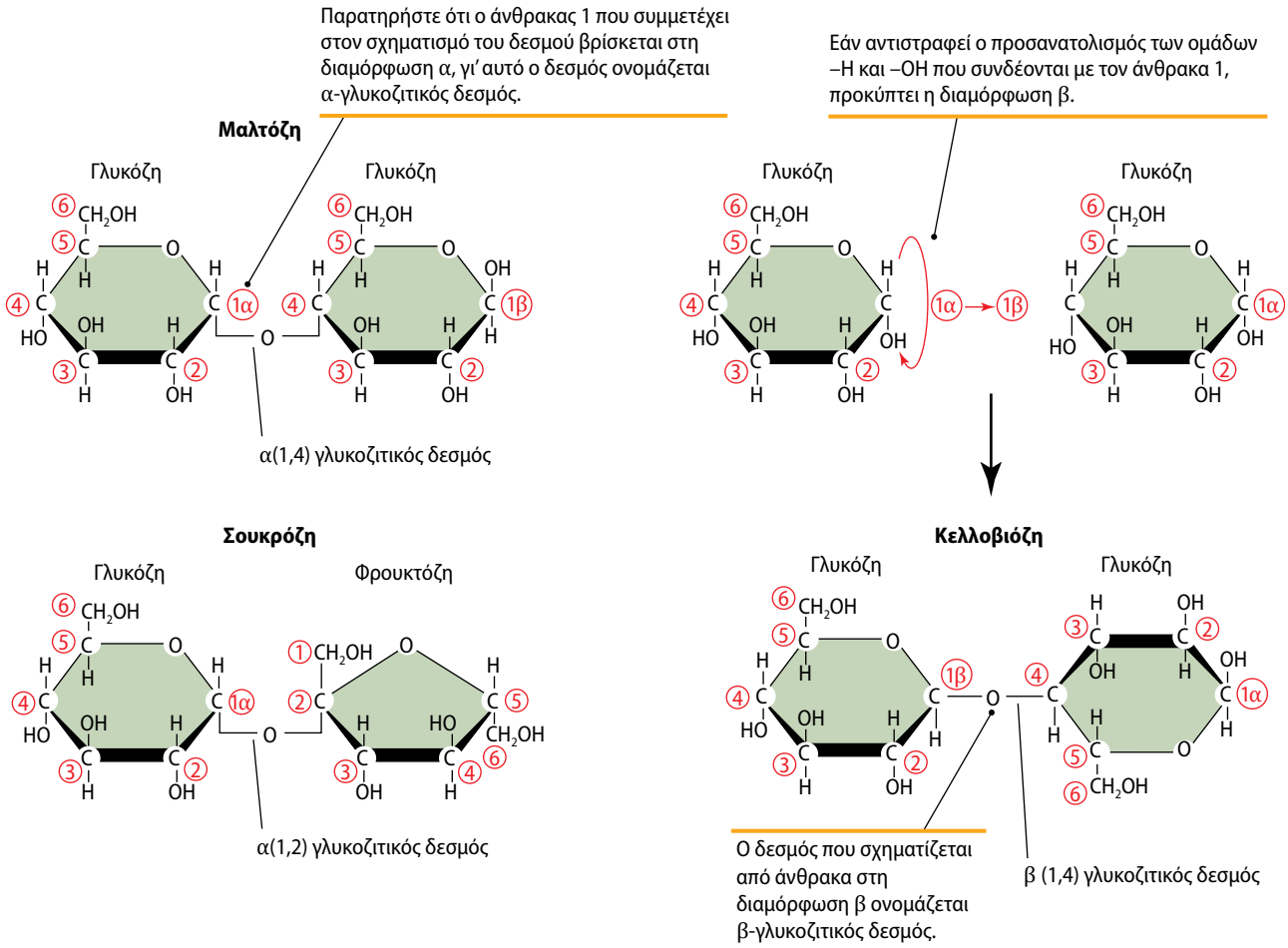
## Πολλά σάκχαρα υφίστανται ως δισακχαρίτες στα κύτταρα

Η γλυκόζη και η ριβόζη αποτελούν παραδείγματα της απλούστερης μορφής ενός σακχάρου, που ονομάζεται **μονοσακχαρίτης**. Στα κύτταρα, τα σάκχαρα απαντώνται συνήθως συνδεδεμένα σε ζεύγη που ονομάζονται **δισακχαρίτες**. Για παράδειγμα, η κοινή επιτραπέζια ζάχαρη, η σακχαρόζη, αποτελείται από γλυκόζη και άλλο ένα σάκχαρο έξι ατόμων άνθρακα, τη φρουκτόζη. Άλλοι κοινοί δισακχαρίτες είναι η λακτόζη και η μαλτόζη.

Δύο σημαντικές ιδιότητες των δισακχαριτών βοηθούν στον καθορισμό της λειτουργίας τους μέσα στα κύτταρα. Η πρώτη είναι απλά ο τύπος του μονοσακχαρίτη που περιέχουν και η δεύτερη είναι το πως αυτοί συνδέονται, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-8**. Οι μονοσακχαρίτες ενώνονται μεταξύ τους μέσω της δημιουργίας ενός **γλυκοζιτικού δεσμού** (μια μορφή αιθερικού δεσμού ειδική για τα σάκχαρα) μεταξύ των ατόμων άνθρακα κάθε σακχάρου. Αυτοί οι δεσμοί δεν είναι όλοι ίδιοι. Όλοι οι δισακχαρίτες σχηματίζονται μεταξύ σακχάρων σε μορφή δακτυλίου. Οι δύο πλευρές του δακτυλίου δεν είναι ποτέ ταυτόσημες επειδή κάθε άνθρακας του δακτυλίου έχει δύο διαφορετικά άτομα (–H, –OH ή –CHO) που εκτείνονται προς τα έξω. Αυτό σημαίνει ότι ο δεσμός που σχηματίζεται μεταξύ δύο ανθράκων που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό είναι διαφορετικός από τον δεσμό που ενώνει δύο άνθρακες με αντίθετες κατευθύνσεις, ακόμη κι αν εμπλέκονται οι ίδιοι άνθρακες. Οι οργανικοί

χημικοί έχουν αναπτύξει ένα σύντομο τρόπο καθορισμού αυτών των δεσμών, δίνοντάς τους έναν αριθμό, ξεκινώντας με τον άνθρακα στο τέλος του γραμμικού μορίου που βρίσκεται πιο κοντά στην ομάδα καρβονυλίου. Οι γλυκοζιτικοί δεσμοί ονομάζονται σύμφωνα με τον αριθμό των ανθράκων που σχηματίζουν τον δεσμό και τον σχετικό στερεοχημικό προσανατολισμό των δύο σακχάρων, είτε α (ίδιος) είτε β (διαφορετικός). Παρατηρήστε τους προσανατολισμούς α και β της γλυκόζης στην Εικόνα 1-8 και τους προκύπτοντες δισακχαρίτες που σχηματίζονται με α1,4 και β1,4 δεσμούς μεταξύ των δύο μορίων γλυκόζης (για όσους δεν είναι εξοικειωμένοι με αυτό το επίπεδο χημείας, το πιο σημαντικό σημείο που πρέπει να αποκομίσετε από αυτή τη συζήτηση είναι ότι οι βιολόγοι δίνουν μεγάλη προσοχή στον ακριβή τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα σάκχαρα και χρησιμοποιούν τη συντομευμένη ονοματολογία που αναπτύχθηκε από τους χημικούς για να ονομάσουν τους δεσμούς).

Μια φαινομενικά ασήμαντη λεπτομέρεια, όπως ο προσανατολισμός ενός μόνο ατόμου, έχει σημαντικές επιδράσεις στα κύτταρα. Όλες οι χημικές αντιδράσεις που είναι απαραίτητες για τη δημιουργία και τη διάσπαση των δεσμών μεταξύ των σακχάρων καταλύονται από ένζυμα, τα οποία είναι πρωτεΐνες που περιέχουν μια θέση δέσμευσης στην οποία λαμβάνουν χώρα αυτές οι χημικές αντιδράσεις. Κάθε ένζυμο έχει συγκεκριμένη θέση δέσμευσης. Αυτό σημαίνει ότι ένα ένζυμο που καταλύει τον σχηματισμό ενός α1,4 γλυκοζιτικού δεσμού δεν μπορεί να καταλύει επίσης τον σχηματισμό ενός β1,6 δεσμού ή ενός β1,4 δεσμού επειδή αυτοί οι δεσμοί έχουν διαφορετικό σχήμα. Ομοίως, τα ένζυμα που διασπούν έναν συγκεκριμένο δεσμό δεν μπορούν να διασπάσουν τους άλλους. Πρακτικά, αυτή η διαφορά καθορίζει ποιους δισακχαρίτες μπορούν να δημιουργήσουν και να διασπάσουν τα κύτταρα, βάσει των τύπων των ενζύμων που περιέχουν. Αυτό εξηγεί επίσης γιατί οι άνθρωποι μπορούν να διασπάσουν πολλούς α1,4 δεσμούς (π.χ. στη σακχαρόζη και τη μαλτόζη)




**ΕΙΚΟΝΑ 1-8** α και β γλυκοζιτικοί δεσμοί στους κοινούς δισακχαρίτες.

αλλά όχι τους περισσότερους β1,4 δεσμούς (π.χ. στη χιτίνη και την κελλοβιόζη): τα ανθρώπινα κύτταρα περιέχουν λίγα ένζυμα που είναι σε θέση να δεσμεύουν και να διασπούν β1,4 γλυκοζιτικούς δεσμούς. Το ένζυμο λακτάση, το οποίο διασπά τον β1,4 δεσμό στον δισακχαρίτη λακτόζη, εκφράζεται μόνο κατά τη βρεφική ηλικία στα περισσότερα θηλαστικά (βλ. Ένθετο 1-12).

## Ολιγοσακχαρίτες και πολυσακχαρίτες; Τα αποθηκευτικά, δομικά και σηματοδοτικά συστατικά των κυττάρων

Όπως ακριβώς τα κύτταρα μπορούν να συνθέσουν δισακχαρίτες από μονοσακχαρίτες, μπορούν επίσης να συνδυάσουν πολλαπλά σάκχαρα σχηματίζοντας μεγαλύτερα πολυμερή. Πολλά από αυτά τα πολυμερή αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες μονάδες δισακχαριτών και ορισμένα από αυτά σχηματίζουν πολύπλοκες διακλαδιζόμενες δομές. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι αυτών των συμπλόκων: οι ολιγοσακχαρίτες και οι πολυσακχαρίτες. Ο όρος **ολιγοσακχαρίτης** (ολιγο- σημαίνει

### ΕΝΘΕΤΟ 1-12 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: **Γιατί οι ενήλικες μπορούν να πίνουν γάλα;**

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των θηλαστικών είναι η παραγωγή γάλακτος για να ταΐσουν τους απογόνους τους. Το κύριο σάκχαρο του γάλακτος είναι η λακτόζη, η οποία είναι ένας δισακχαρίτης που αποτελείται από γλυκόζη και γαλακτόζη που ενώνονται μέσω ενός β1,4 γλυκοζιτικού δεσμού. Προτού μπορέσουν οι απόγονοι να μεταβολίσουν τη λακτόζη, ο γλυκοζιτικός δεσμός πρέπει να διασπαστεί από ένα ένζυμο που ονομάζεται λακτάση. Όλα τα νεογέννητα θηλαστικά εκφράζουν αυτό το ένζυμο. Σύντομα μετά τον απογαλακτισμό, η λακτάση αρχίζει να εξαφανίζεται από το έντερο. Καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξης των θηλαστικών, τα φυσιολογικά υγιή ενήλικα θηλαστικά δεν εξέφραζαν λακτάση και δεν έπιναν γάλα. Σήμερα, περίπου τα δύο τρίτα των ενηλίκων ανθρώπων δεν παράγουν λακτάση. Αυτά τα άτομα ορισμένες φορές αναφέρονται ως «άτομα με δυσανεξία στη λακτόζη».

Ένα σημαντικό βήμα για την ανθρώπινη εξέλιξη έλαβε χώρα πριν από περίπου 8.000-10.000 χρόνια, όταν οι άνθρωποι άρχισαν να εξημερώνουν ζώα που μπορούσαν να παράγουν γάλα. Πριν από περίπου 7.000 χρόνια, εμφανίστηκε μια μικρή ομάδα γενετικών μεταλλάξεων σε πληθυσμούς της Γης, οι οποίες επέτρεψαν στο γονίδιο της λακτάσης να συνεχίσει να εκφράζεται μετά τη βρεφική ηλικία. Αυτό κατέστησε επίσης το φρέσκο γάλα από πρόβατα, βοοειδή, άλογα, καμήλες και άλλα οικόσιτα θηλαστικά διαθέσιμο ως πλούσια πηγή θρεπτικών συστατικών. Τα άτομα που έχουν κληρονομήσει μία από αυτές τις γενετικές παραλλαγές μπορούν να πίνουν γάλα κατά τη διάρκεια της ενήλικης ζωής τους. Αυτό ορισμένες φορές αναφέρεται ως «εμμονή της λακτάσης».

**Ερωτήσεις μελέτης**

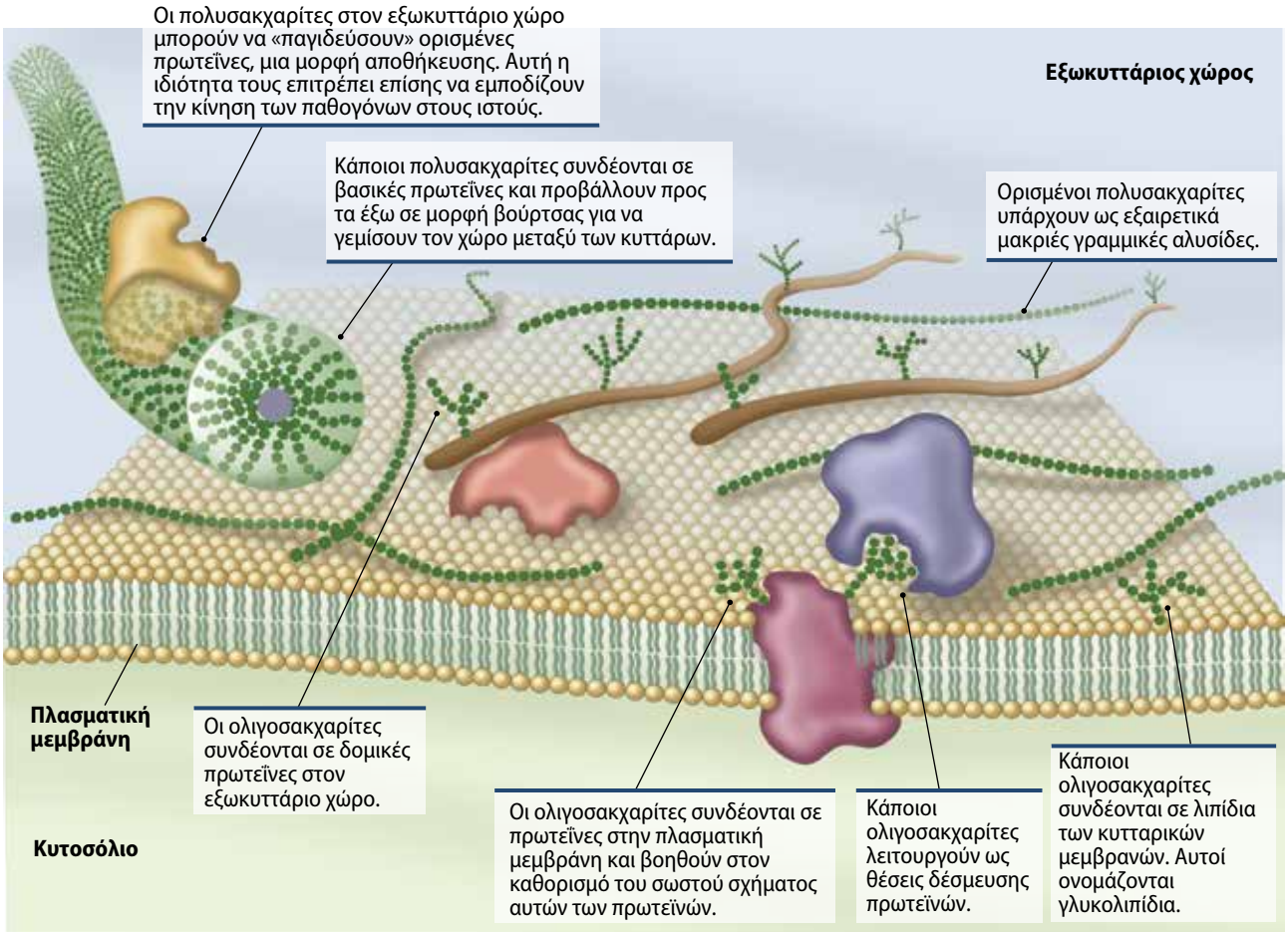
Χρησιμοποιήστε το διαδίκτυο για να μάθετε περισσότερα για τη δυσανεξία στη λακτόζη, την ανθρώπινη εξέλιξη και την παραγωγή γαλακτοκομικών προκειμένου να μπορέσετε να απαντήσετε στις ακόλουθες ερωτήσεις:

1. Τα πιο συνηθισμένα συμπτώματα δυσανεξίας στη λακτόζη είναι πόνος στο στομάχι, μετεωρισμός, αέρια και διάρροια. Πώς εξηγείτε αυτά τα συμπτώματα;
2. Σχεδόν όλοι οι ενήλικες, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που δεν εκφράζουν λακτάση, μπορούν να φάνε τα περισσότερα τυριά. Αφού το τυρί είναι γαλακτοκομικό προϊόν, γιατί δεν πυροδοτεί συμπτώματα στα άτομα που έχουν δυσανεξία στη λακτόζη;
3. Τα άτομα με δυσανεξία στη λακτόζη μπορούν να πίνουν γάλα φυτικής προέλευσης (π.χ. γάλα από σόγια, γάλα αμυγδάλου) χωρίς επιπλοκές. Γιατί συμβαίνει αυτό;
4. Στην αγορά διατίθενται πλέον γαλακτοκομικά προϊόντα «χωρίς λακτόζη» που περιέχουν αγελαδινό γάλα αλλά δεν πυροδοτούν τα συμπτώματα της δυσανεξίας στη λακτόζη. Γιατί μπορεί συμβαίνει αυτό;

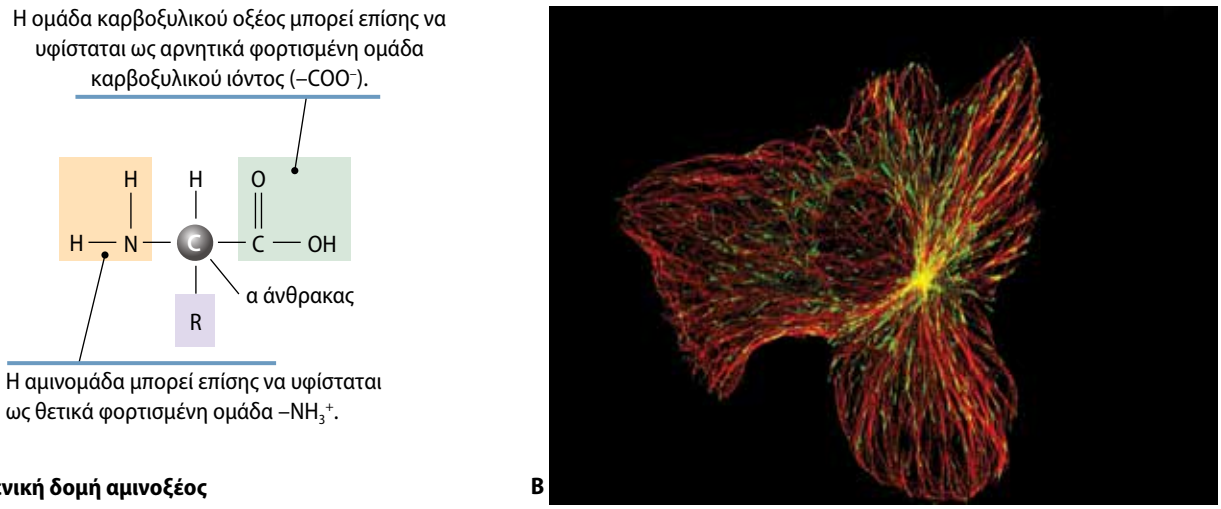
«λίγοι») χρησιμοποιείται συνήθως για την περιγραφή των σακχάρων που συνδέονται σε κυτταρικές πρωτεΐνες και λιπίδια. Οι ολιγοσακχαρίτες παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του σχήματος και της λειτουργίας των μορίων στα οποία συνδέονται (βλ. ενότητα *Καθώς οι πρωτεΐνες εισάγονται στον αυλό του ΕΔ, μπορεί να υποβληθούν σε μεταμεταφραστική τροποποίηση*, στο Κεφάλαιο 8). Οι **πολυσακχαρίτες** είναι εξαιρετικά μεγάλα συμπλέγματα σακχάρων που βρίσκονται στον εξωκυττάριο χώρο. Αυτοί οι πολυσακχαρίτες διαδραματίζουν ποικίλους ρόλους στους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένης της μακροχρόνιας αποθήκευσης των σακχάρων της τροφής (π.χ. άμυλο ή γλυκογόνο) και της ενίσχυσης των φυτικών **κυτταρικών τοιχωμάτων** (π.χ. κυτταρίνη). Σε πολλά ζώα, τόσο οι ολιγοσακχαρίτες όσο και οι πολυσακχαρίτες αποτελούν σημαντικά συστατικά της **εξωκυττάριας θεμέλιας ουσίας**, ενός πυκνού δικτύου μορίων που παρέχει δομική υποστήριξη στους ιστούς. Θα εξετάσουμε την εξωκυττάρια θεμέλια ουσία στο Κεφάλαιο 6 (βλ. ενότητα *Οι πρωτεογλυκάνες παρέχουν ενυδάτωση στους ιστούς)*. Αυτά τα σύμπλοκα συμβάλλουν επίσης στα κυτταρικά δίκτυα σηματοδότησης, όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια, ιδιαίτερα στο Κεφάλαιο 11. Η **Εικόνα 1-9** περιγράφει κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά των ολιγο- και πολυσακχαριτών.

## Τα αμινοξέα σχηματίζουν μόρια πλούσια σε άνθρακα που περιέχουν μια αμινομάδα και μια ομάδα καρβοξυλικού οξέος

Τα αμινοξέα είναι τα δομικά στοιχεία των πρωτεϊνών. Κάθε αμινοξύ περιέχει ένα κεντρικό άτομο άνθρακα, που ονομάζεται α-άνθρακας, το οποίο συνδέεται με τέσσερις διαφορετικές μοριακές δομές. Δύο από αυτές τις δομές είναι λειτουργικές ομάδες (μια *αμινομάδα* και μια ομάδα καρβοξυλικού




**ΕΙΚΟΝΑ 1-9** Οι ολιγοσακχαρίτες και οι πολυσακχαρίτες παίζουν σημαντικούς ρόλους στα κύτταρα. Οι περισσότεροι ολιγοσακχαρίτες και πολυσακχαρίτες εντοπίζονται στην κυτταρική επιφάνεια και στον εξωκυττάριο χώρο.




**ΕΙΚΟΝΑ 1-10** **(A)** Γενική δομή ενός αμινοξέος. Κάθε μοναδικό αμινοξύ φέρει διαφορετική τροποποίηση στη θέση R, η οποία ονομάζεται πλευρική αλυσίδα. **(B)** Τρισδιάστατη απεικόνιση υψηλής ανάλυσης μιας πρωτεΐνης που αποτελείται από μια αναδιπλωμένη, γραμμική αλληλουχία αμινοξέων που συνδέονται με πεπτιδικούς δεσμούς.

(B) Ευγενική χορηγία του Brian O'Rourke, Albert Einstein College of Medicine.

*οξέος*, εξ ου και ο όρος αμινοξύ) και η τρίτη είναι ένα απλό άτομο υδρογόνου. Η τέταρτη δομή, η οποία συχνά ονομάζεται **πλευρική αλυσίδα αμινοξέος** (ή **ομάδα R**), διαφέρει σε κάθε διαφορετικό αμινοξύ, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-10A**.

Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από μακριές, γραμμικές αλληλουχίες αμινοξέων. Αυτές οι αλληλουχίες δημιουργούνται μέσω του σχηματισμού ομοιοπολικών δεσμών (εδώ ονομάζονται **πεπτιδικοί δεσμοί**) μεταξύ της ομάδας καρβοξυλικού οξέος ενός αμινοξέος και της αμινομάδας ενός άλλου. Τα πολυμερή ονομάζονται με βάση τον αριθμό των συνδεδεμένων αμινοξέων. Εάν συνδέονται δύο και τρία αμινοξέα, τα πολυμερή ονομάζονται *διπεπτίδιο* και *τριπεπτίδιο*, αντίστοιχα, ενώ ο όρος *ολιγοπεπτίδιο* αναφέρεται σε έναν μικρό αριθμό αμινοξέων. Το **πολυπεπτίδιο** συνήθως αναφέρεται σε πολυμερή δέκα ή περισσότερων αμινοξέων (ορισμένα πολυπεπτίδια περιέχουν περισσότερα από 1.500 αμινοξέα). Όταν τα πολυπεπτίδια αναδιπλωθούν σε μια σταθερή διαμόρφωση που είναι χρήσιμη για τα κύτταρα, ονομάζονται **πρωτεΐνες**. Οι κυτταρικοί βιολόγοι αναπαριστούν τις πρωτεΐνες με διάφορους τρόπους, που κυμαίνονται από απλές γραμμές και άμορφα σχήματα στην Εικόνα 1-9 έως εξαιρετικά λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα όπως εκείνο που απεικονίζεται στην Εικόνα 1-10B, ανάλογα με το βαθμό της δομικής πληροφορίας που θέλουν να εξετάσουν. Μια ενδελεχής συζήτηση της ονοματολογίας των πολυπεπτιδίων, των πρωτεϊνών και των πρωτεϊνικών υπομονάδων παρέχεται στο Κεφάλαιο 3.

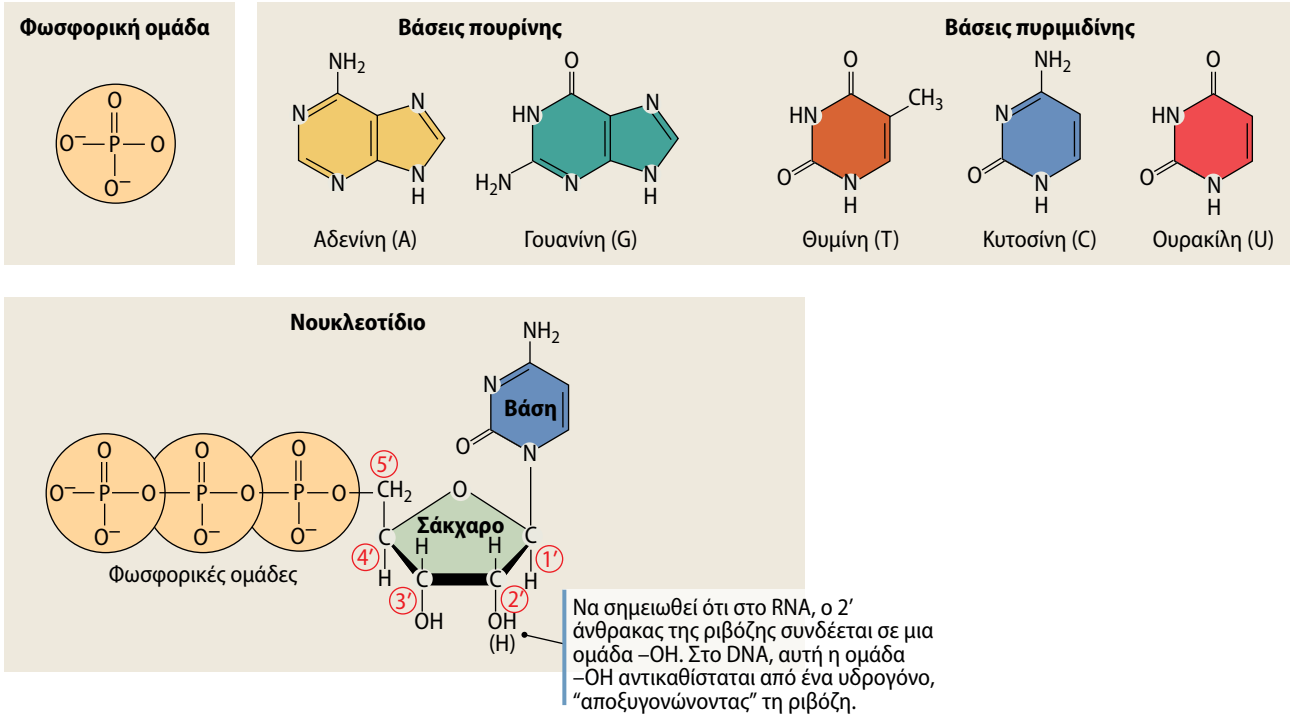
## Οι χημικές τροποποιήσεις των αμινοξέων βοηθούν στον έλεγχο της λειτουργίας των πρωτεϊνών

Η σχέση δομής-λειτουργίας προβλέπει ότι οποιαδήποτε κατάσταση που μεταβάλλει τη διαμόρφωση μιας πρωτεΐνης, επηρεάζει επίσης τη λειτουργία της. Οι αλλαγές στο περιβάλλον μιας πρωτεΐνης (θερμοκρασία, pH, ιοντική ισχύς κ.τ.λ.) έχουν γενικευμένες επιδράσεις στην αναδίπλωση και τη λειτουργία των πρωτεϊνών που ορισμένες φορές είναι δύσκολο να ελεγχθούν. Τα κύτταρα χρησιμοποιούν επίσης στοχευμένες χημικές τροποποιήσεις μεμονωμένων αμινοξέων για να τροποποιήσουν ελαφρώς τη διαμόρφωση των πρωτεϊνών. Αυτές οι τροποποιήσεις πραγματοποιούνται από άλλες πρωτεΐνες και επομένως είναι συγκριτικά εύκολο να ελεγχθούν. Παραδείγματα αυτών των τροποποιήσεων περιλαμβάνουν την προσθήκη φωσφορικών ομάδων, μεθυλομάδων και ακετυλομάδων στις πλευρικές αλυσίδες των αμινοξέων. Αυτές οι τροποποιήσεις είναι εύκολα αναστρέψιμες, επιτρέ-

ποντας στα κύτταρα να ρυθμίζουν με μεγάλη ακρίβεια τη διαμόρφωση μεμονωμένων πρωτεϊνών. Άλλες τροποποιήσεις είναι μόνιμες και απαραίτητες για τη λειτουργία μιας πρωτεΐνης. Δύο παραδείγματα μόνιμων τροποποιήσεων είναι η προσθήκη ολιγοσακχαριτών στις πλευρικές αλυσίδες αμινοξέων και η δημιουργία ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ πλευρικών αλυσίδων αμινοξέων. Η χημική βάση της πρωτεϊνικής δομής και των τροποποιήσεων των πρωτεϊνών εξετάζεται λεπτομερώς στα Κεφάλαια 3, 9 και 11.

## Τα νουκλεοτίδια είναι πολύπλοκες δομές που περιέχουν ένα σάκχαρο, μια φωσφορική ομάδα και μια βάση

Τα νουκλεοτίδια είναι τα δομικά στοιχεία του DNA και του RNA, του γενετικού υλικού των κυττάρων. Τα νουκλεοτίδια που απαρτίζουν το RNA περιέχουν ένα σάκχαρο πέντε ανθράκων που ονομάζεται ριβόζη, ενώ εκείνα που εντοπίζονται στο DNA περιέχουν μια τροποποιημένη ριβόζη που ονομάζεται δεοξυριβόζη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1-11**. Το τμήμα σακχάρου των νουκλεοτιδίων έχει πάντα μορφή δακτυλίου. Μια δεύτερη δακτυλιοειδής ένωση που περιέχει άζωτο, και ονομάζεται βάση, συνδέεται ομοιοπολικά με το σάκχαρο. Το νουκλεοτίδιο ονομάζεται σύμφωνα με τον τύπο της βάσης που περιέχει. Όταν οι βάσεις συνδέονται με σάκχαρα, όπως στα νουκλεοτίδια, αλλάζει το σύστημα ονοματολογίας των ανθράκων και προστίθεται μια «απόστροφος» στον αριθμό (π.χ. 1′, 2′, 3′). Στον 5′ άνθρακα μπορούν να συνδεθούν ένα, δύο ή τρία φωσφορικά οξέα ενώ η βάση συνδέεται στον 1′ άνθρακα. Τα κύτταρα ενώνουν ένα μόνο φωσφορικό οξύ που είναι συνδεδεμένο στον 5′ άνθρακα ενός νουκλεοτιδίου με τον 3′ άνθρακα ενός άλλου δημιουργώντας πολυμερή νουκλεοτιδίων, που ονομάζονται νουκλεϊκά οξέα. Αυτά τα πολυμερή περιέχουν πάνω από 100 εκατομμύρια νουκλεοτίδια και αυτή η αλληλουχία νουκλεοτιδίων αποτελεί τον τρόπο αποθήκευσης της γενετικής πληροφορίας όλων των οργανισμών. Θα εξετάσουμε τη δομή του DNA και του RNA πιο λεπτομερώς στα Κεφάλαια 2 και 7.




**ΕΙΚΟΝΑ 1-11** Τα νουκλεοτίδια αποτελούνται από ένα σάκχαρο, μια βάση και μία έως τρεις φωσφορικές ομάδες. Να σημειωθεί ότι προστίθενται απόστροφοι στους αριθμούς άνθρακα του σακχάρου σε ένα νουκλεοτίδιο.

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΝΟΙΑΣ 2

Φανταστείτε για μια στιγμή ότι έχει ανακαλυφθεί ζωή σε έναν άλλο πλανήτη. Προς έκπληξη των επιστημόνων, δεν έχει βάση ούτε τον άνθρακα ούτε το νερό. Ωστόσο, από πολλές απόψεις, μοιάζει με γήινες μορφές ζωής, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ισοδύναμων λιπιδίων, σακχάρων, αμινοξέων και νουκλεοτιδίων. Ποιες κρίσιμες χημικές ιδιότητες θα περίμενε κανείς να έχουν αυτά τα εξωγήινα μόρια;

## 1.4 Τα κύτταρα πρέπει να συνεργαστούν για να πετύχουν

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Οι προκαρυώτες είναι οι απλούστερες και πιο άφθονες μορφές ζωής στη Γη.
- Τα βιοφίλμ υποστηρίζουν τους προκαρυώτες και τους ευκαρυώτες σε ένα συμβιωτικό δίκτυο.
- Οι ευκαρυώτες είναι πολύπλοκα κύτταρα ικανά να σχηματίσουν πολυκύτταρους οργανισμούς.
- Οι ολοβιώτες είναι πολυκύτταρες μορφές ζωές που αποτελούνται από ευκαρυώτες και προκαρυώτες.

Σ' αυτήν την ενότητα, θα μελετήσουμε τις τρεις επικράτειες οργανισμών και θα επισημάνουμε τα διακριτά χαρακτηριστικά τους σε κυτταρικό επίπεδο. Καθώς ακολουθούμε την εξέλιξη της πολυπλοκότητας της ζωής στη Γη, το επόμενο βήμα μετά τα βιομόρια είναι οι μονοκύτταροι οργανισμοί. Οι απλούστεροι και παλαιότεροι τύποι αυτών των οργανισμών ονομάζονται προκαρυώτες. Αυτοί περιλαμβάνουν τις επικράτειες των Βακτηρίων και των Αρχαιοβακτηρίων που απεικονίζονται στην Εικόνα 1-3. Αναμένουμε (βάσει της 1ης αρχής της κυτταρικής βιολογίας) ότι δεν λειτουργούν σε πλήρη απομόνωση, παρόλο που περιγράφονται ως μονοκύτταροι οργανισμοί. Πρέπει να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους, συμπεριλαμβανομένων άλλων οργανισμών, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Όταν λειτουργούν μεμονωμένα, οι βιολόγοι ονομάζουν αυτήν την κατάσταση πλαγκτονική ή «κατάσταση ελεύθερης διαβίωσης».

Σε ορισμένες περιπτώσεις, ζεύγη προκαρυωτών βρίσκονται σε κατάσταση «εξαρτώμενης διαβίωσης» μεταξύ τους, που ονομάζεται **συμβίωση**. Κάθε οργανισμός που συμμετέχει σε αυτή τη σχέση ονομάζεται **συμβιώτης**. Οι συμβιωτικές σχέσεις μπορεί να ωφελούν και τους δύο οργανισμούς (αμοιβαιότητα), να ωφελούν τον έναν χωρίς να προξενούν βλάβη στον άλλο (κοινοβίωση), ή να ωφελούν τον έναν προξενώντας βλάβη στον άλλον (παρασιτισμός). Η συμβίωση δεν περιορίζεται σε ζεύγη κυττάρων. Τεράστιοι πληθυσμοί κυττάρων που αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διαφορετικά είδη υπακούουν στους ίδιους κανόνες με τις μικρότερες ομάδες, υπό την προϋπόθεση ότι έχουν αλληλεξαρτώμενη σχέση.

Οι βιολόγοι πιστεύουν ότι αυτή η ικανότητα δημιουργίας συμβιωτικών σχέσεων οδήγησε στην εμφάνιση της επικράτειας των ευκαρυωτών πριν από περίπου 1,2 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν κάποια αρχαιοβακτήρια εγκόλπωσαν βακτήρια χωρίς να τα καταστρέψουν. Αυτό πιθανώς συνέβη πάρα πολλές φορές κατά τη διάρκεια των περίπου 2 δισεκατομμυρίων ετών μετά την εμφάνιση της ζωής, οδηγώντας σε πολλούς διαφορετικούς τύπους κυτταρικών «ομάδων». Ακριβώς όπως οι διάφοροι τύποι πρωτοκυττάρων ανταγωνίστηκαν οδηγώντας στην εμφάνιση των πρώτων πραγματικών μονοκύτταρων οργανισμών, αυτές οι κυτταρικές ομάδες υποβλήθηκαν σε φυσική επιλογή και μόνο οι «καλύτερες» ομάδες επιβίωσαν ώστε να κληροδοτήσουν αυτή τη συμβιωτική σχέση στους απογόνους τους. Οι νικητές αυτής της αναμέτρησης κατάφεραν να αναθέσουν υπο-καθήκοντα σε αυτούς τους εσωτερικούς συνεργάτες, καθιστώντας τους περισσότερο ανταγωνιστικούς από άλλες ομάδες κάτω από το βάρος της φυσικής επιλογής. Αυτή η μόνιμη κατάσταση συνεργασίας παραμένει έως σήμερα σε όλους τους ευκαρυώτες, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου.

Παρόλο που οι προκαρυώτες βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία από ότι οι ευκαρυώτες, οι ευκαρυώτες χαρακτηρίζονται από πολύ μεγαλύτερη δομική ποικιλομορφία. Οι βιολόγοι πιστεύουν ότι αυτό συμβαίνει επειδή οι ευκαρυώτες μπορούν να αναθέτουν μια υποομάδα εργασιών σε εξειδικευμένα διαμερίσματα στο εσωτερικό τους, που ονομάζονται οργανίδια. Αυτά τα διαμερίσματα αποτελούν το προϊόν της ομαδικής εργασίας των πρώιμων ευκαρυωτών. Η στρατηγική «διαίρει και βασίλευε» έδωσε στους ευκαρυώτες την ικανότητα να εξειδικεύονται περισσότερο από τους προκαρυώτες, γεγονός που με τη σειρά του ενίσχυσε ακόμη περισσότερο την συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τύπων ευκαρυωτικών κυττάρων.

Αν προεκτείνουμε την αρχή της συνεργασίας ένα βήμα παραπέρα, είναι λογικό ότι σταθερές ομάδες μονοκύτταρων ευκαρυωτών θα ήταν επίσης ανταγωνιστικές σε ορισμένα περιβάλλοντα, αν μπορούσαν να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν ως ενιαία μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν οι πολυκύτταροι οργανισμοί όπως ο άνθρωπος. Πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι ο σχηματισμός ακόμη πιο σύνθετων ομάδων δεν αποτελεί πάντα επιτυχημένη στρατηγική: η υπεροχή των προκαρυωτικών οργανισμών σήμερα παρέχει σαφείς ενδείξεις πως το γεγονός ότι παρέμειναν ως μονοκύτταροι, σχετικά μη εξειδικευμένοι οργανισμοί υπήρξε μια πολύ επιτυχημένη στρατηγική για δισεκατομμύρια χρόνια. Κάθε μορφή ζωής που υπάρχει σήμερα στη Γη αποτελεί προϊόν της εξέλιξης μέσω φυσικής επιλογής και η εξέλιξη δεν ευνοεί την πολυπλοκότητα απλά για χάρη της πολυπλοκότητας. Εάν το να παραμείνει ένας οργανισμός μονοκύτταρος είναι ο πιο επιτυχημένος τρόπος επιβίωσης και αναπαραγωγής σε ένα δεδομένο περιβάλλον, η φυσική επιλογή θα τον ευνοήσει.

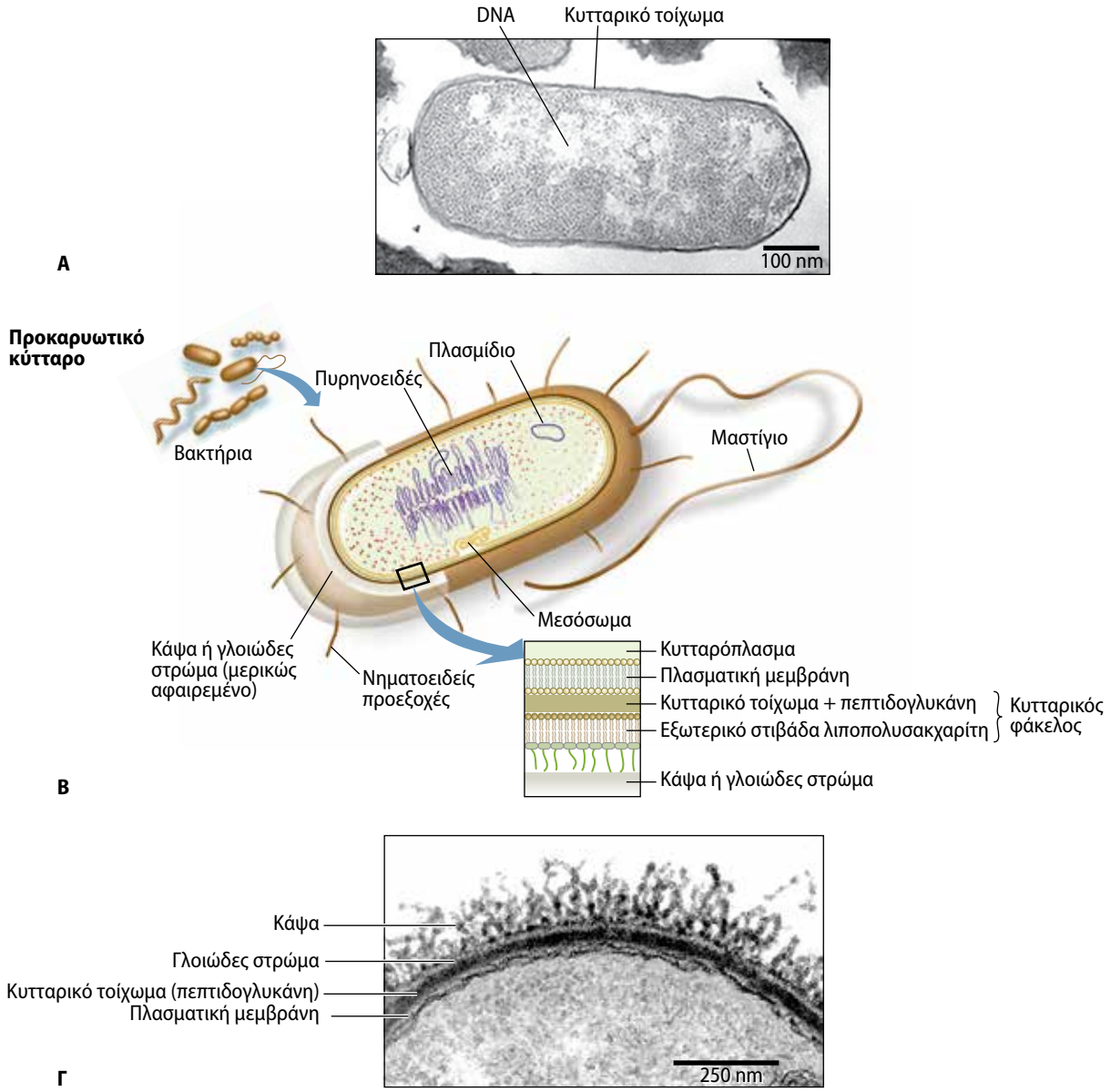
Αυτή η ενότητα ολοκληρώνεται με μια συζήτηση για μερικές από τις πιο εντυπωσιακές μορφές συνεργασίας στη βιολογία: τους ολοβιώτες. Αυτοί οι οργανισμοί χαρακτηρίζονται από μια μόνιμη συνεργατική σχέση μεταξύ των ευκαρυωτών και των προκαρυωτών. Οι άνθρωποι και οι πολυάριθμοι προκαρυώτες που πρέπει να ζουν μέσα τους για να τους διατηρούν υγιείς (το λεγόμενο μικροβίωμα) αποτελούν ένα εξαιρετικό παράδειγμα.

## Οι προκαρυώτες είναι οι απλούστερες μορφές κυττάρων

Τρία χαρακτηριστικά είναι μοναδικά για τους προκαρυώτες (βλ. **Εικόνα 1-12**):

- **Οι προκαρυώτες έχουν μόνο μία μεμβράνη: την πλασματική μεμβράνη.** Επειδή όλες οι εσωτερικές χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε ένα μοναδικό διαμέρισμα, το κυτταρόπλασμα, ο βαθμός εξειδίκευσης που επιτυγχάνουν αυτά τα κύτταρα είναι περιορισμένος. Ορισμένοι προκαρυώτες εξέλιξαν πολύπλοκες τροποποιήσεις της πλασματικής μεμβράνης, όπως στοίβες μεμβρανικών πτυχώσεων που τους παρέχουν κάποιο βαθμό διαμερισματοποίησης. Παρομοίως, το κυτοσόλιο των προκαρυωτών φαίνεται ανομοιογενές, κατά την παρατήρησή του με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Εικόνα 1-12Α), υποδεικνύοντας ότι μπορεί να διαθέτει κάποιο βαθμό οργάνωσης.
- **Όλοι οι προκαρυωτικοί οργανισμοί είναι μονοκύτταροι.** Οι προκαρυώτες δεν δημιουργούν πολυκύτταρους οργανισμούς, παρόλο που ορισμένοι από αυτούς συναθροίζονται σχηματίζοντας τεράστιες συμβιωτικές δομές που ονομάζονται **βιοφίλμ** (βιοϋμένια, βιομεμβράνες).
- **Οι προκαρυώτες δεν διαιρούνται με μίτωση.** Οι περισσότερες γενετικές πληροφορίες των προκαρυωτικών κυττάρων περιέχονται σε ένα μόνο κυκλικό μόριο DNA που ονομάζεται **χρωμόσωμα**, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του ευκαρυωτικού DNA βρίσκεται σε πολυάριθμα γραμμικά χρωμοσώματα. Η μίτωση, η οποία είναι ένας πολύπλοκος μηχανισμός που εξασφαλίζει τον σωστό διαχωρισμό των χρωμοσωμάτων κατά την κυτταρική διαίρεση, εξελίχθηκε μόνο στους ευκαρυωτικούς οργανισμούς. Οι προκαρυώτες διαιρούνται με διχοτόμηση αντί για μίτωση.

Τα βακτήρια διαχωρίστηκαν από τον LUCA πριν από τα Αρχαιοβακτήρια και τους Ευκαρυώτες. Τα Αρχαιοβακτήρια ταξινομούνται ως διακριτοί προκαρυώτες επειδή εμφανίζουν τέσσερις σημαντικές




**ΕΙΚΟΝΑ 1-12** Οι προκαρυώτες είναι οι απλούστεροι κυτταρικοί τύποι. **(Α)** Ηλεκτρονική μικρογραφία ενός βακτηριακού κυττάρου, το οποίο είναι προκαρυώτης. **(Β)** Συνήθεις δομές που απαντώνται στους προκαρυώτες. **(Γ)** Η κάψα στους προκαρυώτες συνδέεται με το κυτταρικό τοίχωμα, το στρώμα S ή την εξωτερική μεμβράνη. Ηλεκτρονική μικρογραφία της κάψας ενός στελέχους βακτηρίων *Bacillus anthracis*.

(Α) Η φωτογραφία είναι ευγενική χορηγία του Jonathan King, Ινστιτούτο Τεχνολογίας Μασαχουσέτης, (Γ) Αναδημοσιεύθηκε στο *J. Bacteriol*., 1998, vol. 180, pp. 52–58, DOI και αναδημοσιεύεται με άδεια από την Αμερικανική Εταιρεία Μικροβιολογίας. Ευγενική χορηγία της Agnes Fouet, Ινστιτούτο Pasteur.

διαφορές σε σχέση με τα βακτήρια. Πρώτον, το ενζυμικό σύμπλοκο που χρησιμοποιούν για τη σύνθεση RNA μοιάζει περισσότερο με το αντίστοιχο ευκαρυωτικό παρά με τη βακτηριακή εκδοχή του. Δεύτερον, τα πρωτεϊνικά και τα RNA συστατικά των ριβοσωμάτων στα Αρχαιοβακτήρια μοιάζουν περισσότερο με εκείνα που εντοπίζονται στους ευκαρυώτες. Τρίτον, οι κυτταρικές μεμβράνες των Αρχαιοβακτηρίων περιέχουν συστατικά που δεν απαντώνται ούτε στα βακτήρια ούτε στους ευκαρυώτες. Τέταρτον, τα συστατικά των κυτταρικών τοιχωμάτων στα Αρχαιοβακτήρια είναι επίσης αρκετά διαφορετικά από τα αντίστοιχα συστατικά των βακτηρίων.

Παρά τη σχετικά απλή δομή τους, οι προκαρυώτες μπορούν να ζουν σε ορισμένα από τα πιο ακραία περιβάλλοντα της Γης. Αυτά περιλαμβάνουν εξαιρετικά υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, τεράστια ατμοσφαιρική πίεση, ελάχιστο ή καθόλου οξυγόνο και τιμές pH που κυμαίνονται από 2

έως 12. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι οι σύγχρονοι προκαρυώτες αποτελούν τους άμεσους απογόνους των πρώιμων κυττάρων της Γης, τα οποία εξελίχθηκαν σε περιβαλλοντικές συνθήκες πολύ διαφορετικές από τις σημερινές. Χάρη, εν μέρει, στον υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητά τους, οι προκαρυώτες είναι επίσης μακράν οι πιο άφθονοι οργανισμοί στη Γη.

## Τα προκαρυωτικά κύτταρα προστατεύονται με ένα κυτταρικό τοίχωμα

Οι περισσότεροι προκαρυώτες διαθέτουν ένα πρόσθετο προστατευτικό στρώμα έξω από την κυτταρική μεμβράνη. Ο γενικός όρος για αυτή τη δομή είναι **κυτταρικό τοίχωμα** πεπτιδογλυκάνης και το τμήμα του που είναι άμεσα συνδεδεμένο με την εξωτερική μεμβράνη των αρνητικών κατά gram βακτηρίων, ή το S στρώμα των θετικών κατά gram βακτηρίων, συχνά αποκαλείται **κάψα** (Εικόνα 1-12, πλαίσια Β και Γ). Το κυτταρικό τοίχωμα αποτελείται κυρίως από μόρια σακχάρων που συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα πυκνό πλέγμα. Εκτός από την προστασία από φυσικό τραυματισμό, το κυτταρικό τοίχωμα συγκρατεί νερό εξασφαλίζοντας τη σωστή ενυδάτωση του κυττάρου και την προστασία του από τη ρήξη.

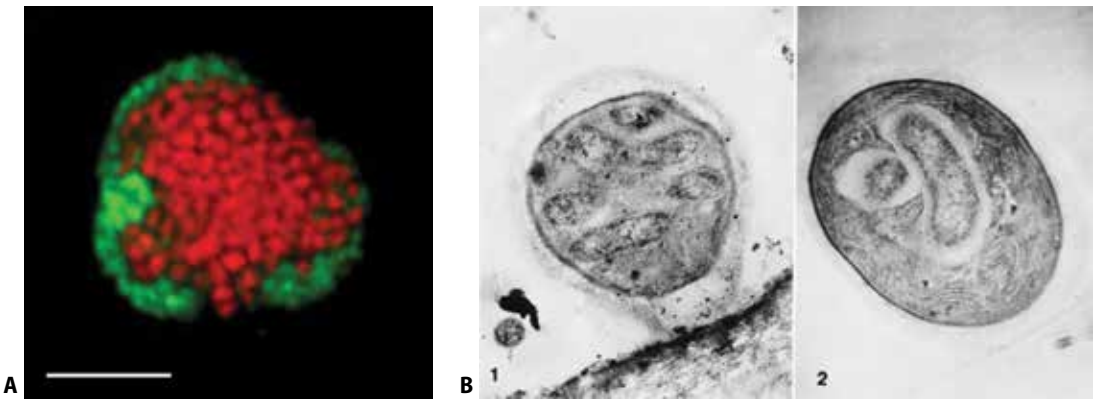
## Κυτταρική συνεργασία σε δράση: Οι περισσότεροι προκαρυώτες είναι πιο επιτυχημένοι ως συμβιώτες παρά ως πλαγκτονικά κύτταρα

Παρά το γεγονός ότι είναι οι μικρότερες και δομικά απλούστερες μορφές ζωής, οι προκαρυώτες είναι από τους πιο εξελιγμένους και ανθεκτικούς οργανισμούς της Γης. Επειδή ήταν οι πρώτες επιτυχημένες μορφές ζωής στον πλανήτη, οι προκαρυώτες έχουν υποστεί εξέλιξη μέσω φυσικής επιλογής για πάνω από 3 δισεκατομμύρια χρόνια και επομένως έχουν αναπτύξει κάποιες ισχυρές στρατηγικές επιβίωσης. Μπορούν να επιβιώσουν ακόμη και στα πιο εχθρικά περιβάλλοντα και να εξελιχθούν γρήγορα υπό την απειλή περιβαλλοντικής καταπόνησης. Η ταχεία εμφάνιση βακτηρίων ανθεκτικών στα φάρμακα μετά την εισαγωγή των αντιβιοτικών τον 20ο αιώνα αποτελεί σαφή ένδειξη της προσαρμοστικότητάς τους. Το 1995, οι επιστήμονες ήταν σε θέση να επαναφέρουν και να καλλιεργήσουν βακτήρια που είχαν παγιδευτεί σε απολιθωμένο ρετσίνι δένδρων (κεχριμπάρι) για τουλάχιστον 25 εκατομμύρια χρόνια.

Παρά την πρόοδο αυτή, οι περισσότεροι προκαρυώτες είναι δύσκολο να μελετηθούν, για έναν εντυπωσιακά απλό λόγο: οι επιστήμονες δεν μπορούν να τους διατηρήσουν ζωντανούς στο εργαστήριο. Παραδείγματος χάριν, πάνω από 90% των γνωστών θαλάσσιων προκαρυωτών δεν μπορούν να καλλιεργηθούν από τον άνθρωπο. Καμία ποσότητα θρεπτικών ουσιών δεν μπορεί να τους διατηρήσει ζωντανούς εκτός του φυσικού τους περιβάλλοντος. Η 1η αρχή της κυτταρικής βιολογίας παρέχει μια λογική εξήγηση: όταν απομακρύνονται από το φυσικό τους περιβάλλον, χάνουν την επαφή με τους οργανισμούς που είναι απαραίτητοι για την επιβίωσή τους. Χάνουν τους συνεργάτες τους. Τα περισσότερα υδρόβια βακτήρια υπάρχουν ως βιοφίλμ που περιλαμβάνουν περισσότερα από ένα είδη, και είναι δύσκολο να αναπαραχθούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες που ευνοούν τις συμβιωτικές σχέσεις που χρειάζονται αυτά τα κύτταρα.

Αυτή η εξάρτηση από τη συνεργασία είναι τόσο εκτεταμένη, που ορισμένοι προκαρυώτες εξαρτώνται από άλλους για να τραφούν: καταναλώνουν τα μεταβολικά προϊόντα των γειτόνων τους (**Εικόνα 1-13Α**). Άλλοι εγκολπώνουν ο ένας τον άλλο (βλ. **Εικόνα 1-13Β**), παρέχοντας έτσι άμεση απόδειξη ότι τα ευκαρυωτικά κύτταρα πιθανότατα εξελίχθηκαν από παρόμοιες αμοιβαία επωφελείς σχέσεις μεταξύ των προκαρυωτικών προγόνων τους. Αυτό διαφέρει από το να τρώει κανείς απλά τους γείτονές του. Είναι ζωτικής σημασίας και οι δύο πλευρές να παραμείνουν ζωντανές, διότι η καθεμία διαδραματίζει ενεργό ρόλο στη στήριξη της συνεργασίας.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του σχηματισμού ενός βιοφίλμ είναι ότι μια τέτοια δομή διευκολύνει τα κύτταρα να δεσμεύσουν και να αποθηκεύσουν χημική ενέργεια. Αυτό βασίζεται στην απλή έννοια των διαβαθμίσεων συγκέντρωσης: η αρχή της ώσμωσης αναφέρει ότι υψηλές




**ΕΙΚΟΝΑ 1-13** Προκαρυωτική ομαδική εργασία. Το πλαίσιο **(A)** δείχνει αρχαία (πορτοκαλί χρώμα) που περιβάλλονται από βακτήρια (πράσινο χρώμα). Τα αρχαία εξάγουν ενέργεια από το μεθάνιο ($CH_4$), απελευθερώνοντας αέριο υδρογόνο ($H_2$) ως παραπροϊόν. Τα βακτήρια καταναλώνουν το $H_2$, το οποίο επιτρέπει στα αρχαία να συνεχίζουν να τρέφονται με μεθάνιο. Το πλαίσιο **(B)** δείχνει βακτήρια που ζουν μέσα σε έναν προκαρυώτη, το κυανοβακτήριο *Pleurocapsa minor.*

(A) Πλαίσιο (g) από Εικόνα 2 της σελίδας 624 του άρθρου του Boetius: Boetius A, Ravenschlag K, Schubert CJ, Rickert D, Widdel F, Gieseke A, Amann R, Jorgensen BB, Witte U, Pfannkuche O. 2000. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature* 407:623–626. https://doi.org/10.1038/35036572. (B) Wujek DE. 1979. Intracellular bacteria in the blue-green alga *Pleurocapsa minor*. *Trans Am Microsc Soc* 98:143–145. https://doi.org/10.2307/3225953. Πηγή: Εικόνα 1, σελ. 144 του άρθρου του Wujek.

συγκεντρώσεις μιας διαλυμένης ουσίας (συμπεριλαμβανομένων ιόντων όπως H+, OH–, Na+ και Cl–, τα οποία βρίσκονται σε αφθονία στο θαλασσινό νερό) θα διαχυθούν αυθόρμητα σε περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις (δηλ. να φθάσουν σε ισορροπία). Ακόμη και τα πρώιμα κύτταρα έπρεπε να αναπτύξουν ένα μέσο δέσμευσης ενέργειας και ένας από τους απλούστερους τρόπους για να το κάνουν αυτό ήταν η δέσμευση της ενέργειας των ιόντων κατά τη μετακίνησή τους στο θαλασσινό νερό. Το νερό που διαφεύγει από κάποιες υδροθερμικές πηγές στους ωκεανούς περιέχει χαμηλότερες συγκεντρώσεις ιόντων $H^+$ και υψηλότερες συγκεντρώσεις ιόντων $OH^-$ σε σχέση με το θαλασσινό νερό που υπάρχει γύρω τους (δηλ. είναι πιο αλκαλικό σε σχέση με το νερό που τα περιβάλλει), δημιουργώντας μία σταθερή βαθμίδωση πρωτονίων (ιόντων $H^+$) στο νερό που βρίσκεται κοντά σε αυτές τις πηγές.

Τα πρώιμα κύτταρα εκμεταλλεύτηκαν αυτή τη διαφορά συγκέντρωσης επιτρέποντας στα πρωτόνια να διέρχονται μέσω μιας πρωτεΐνης στην πλασματική τους μεμβράνη καθώς μετακινούνταν προς περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης. Αυτή η πρωτεΐνη μετέτρεπε τη μετακίνηση των πρωτονίων σε ATP, μια μορφή νουκλεοτιδίου που χρησιμοποιούν όλα τα κύτταρα ως πηγή ενέργειας. Ο LUCA ανέπτυξε αυτόν τον μηχανισμό δέσμευσης ενέργειας και όλοι οι οργανισμοί εξακολουθούν να χρησιμοποιούν κάποια εκδοχή του σήμερα.

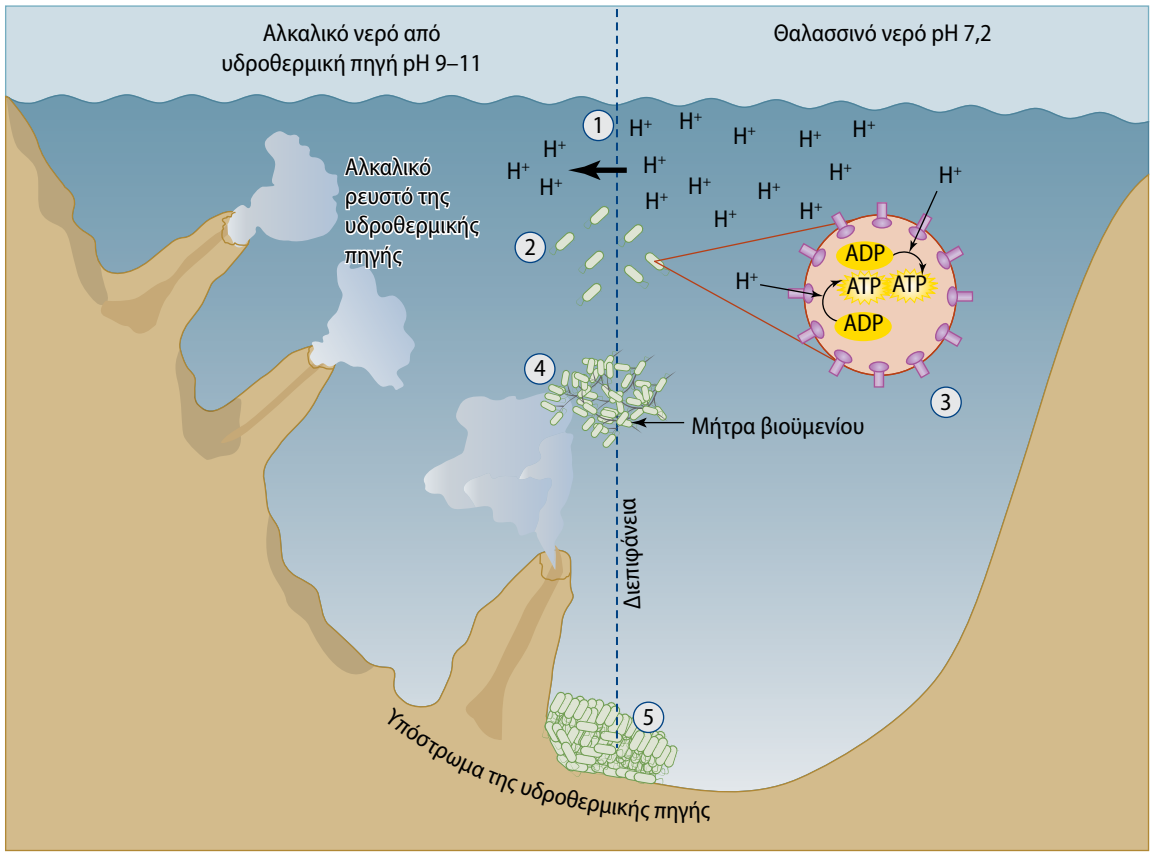
Παρόλο που τα μεμονωμένα κύτταρα είναι σε θέση να δεσμεύουν την ενέργεια της βαθμίδωσης πρωτονίων, αν τα κύτταρα τοποθετηθούν το ένα κοντά στο άλλο, περισσότερα από αυτά μπορούν να επωφεληθούν από την ίδια διαφορά συγκέντρωσης, όπως δείχνει η **Εικόνα 1-14**. Τα κύτταρα στα βιοφίλμ εκκρίνουν μια μήτρα (ή στρώμα) πολυσακχαριτών, πρωτεϊνών, νουκλεϊκών οξέων και λιπιδίων (που συλλογικά ονομάζονται εξωκυττάριες πολυμερείς ουσίες) που τα βοηθούν να προσκολληθούν σε μια επιφάνεια και να παραμείνουν κοντά στα γειτονικά τους κύτταρα. Μέσα σε αυτή τη μήτρα, μπορούν να αξιοποιήσουν τη βαθμίδωση πρωτονίων στο περιβάλλον νερό. Αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο είναι τόσο δύσκολο να διατηρηθούν ζωντανοί στο εργαστήριο οι προκαρυώτες που ζουν κοντά σε υδροθερμικές πηγές: η αντιγραφή και η διατήρηση αυτής της βαθμίδωσης πρωτονίων σε ένα τεχνητό περιβάλλον είναι δαπανηρή. Αυτό δείχνει επίσης πώς η απλή συμπεριφορά των ιόντων στο νερό παίζει κεντρικό ρόλο στην εξέλιξη της ζωής στη Γη.

Μια λογική επέκταση αυτής της διάταξης είναι ότι, καθώς τα βιοφίλμ γίνονταν πιο σταθερά και ανέπτυσσαν πιο εξελιγμένες μεθόδους για την αξιοποίηση της βαθμίδωσης πρωτονίων, η φυσική επιλογή θα τα ευνοούσε. Αυτό έδωσε την εξελικτική ώθηση για εξειδίκευση εντός των βιοφίλμ: ορι-

σμένα κύτταρα θα μπορούσαν να αναπτύξουν καλύτερους τρόπους για να κατευθύνουν τα πρωτόνια προς τις πρωτεΐνες μετατροπής ενέργειας (π.χ. μειώνοντας τη διαπερατότητα των μεμβρανών τους στα πρωτόνια), ενώ άλλα θα μπορούσαν να αναπτύξουν πιο αποτελεσματικές πρωτεΐνες μετατροπής. Τελικά, τα κύτταρα που απαρτίζουν ένα βιοφίλμ θα ανέπτυσσαν μεθόδους για κοινή χρήση της δεσμευόμενης ενέργειας με τους γείτονές τους. Τα σύγχρονα βιοφίλμ που ζουν κοντά σε θερμικές πηγές έχουν κάνει ακριβώς αυτό.

## Ο ανταγωνισμός για πόρους και η ελαττωματική επιδιόρθωση του DNA καθοδηγούν την εξέλιξη των προκαρυωτών

Ακόμη και οι πιο συνεργατικές ομάδες αντιμετωπίζουν προβλήματα όταν οι πόροι γίνονται σπάνιοι. Τα βιοφίλμ δεν μπορούν να αναπτύσσονται για πάντα: τελικά, τα νέα μέλη της ομάδας διαπιστώνουν ότι υπάρχει ένα όριο στην ποσότητα του ATP που εξάγεται ακόμη και από την πιο πλούσια υδροθερμική πηγή και μπορεί να μην επιβιώσουν όταν οι πόροι ελαττωθούν. Αυτό προετοιμάζει το έδαφος για το νέο μεγάλο βήμα στην εξέλιξη της ζωής στη Γη: τον ανταγωνισμό μεταξύ ομάδων οργανισμών.




(1) Το αλκαλικό νερό που διαφεύγει από τις υδροθερμικές πηγές έχει λιγότερα πρωτόνια (ιόντα H+) σε σχέση με το θαλασσινό νερό. Στην περιοχή στην οποία το αλκαλικό και το φυσιολογικό νερό έρχονται σε επαφή και αναμιγνύονται μεταξύ τους (στη διεπαφή), υπάρχει μία κλίση (βαθμίδωση) πρωτονίων, που αναπαρίσταται ως βαθμίδωση pH, η οποία ωθεί τα πρωτόνια από το φυσιολογικό θαλασσινό νερό στο αλκαλικό νερό.
(2) Οι προκαρυώτες που κολυμπούν ελεύθερα (πλαγκτονικοί) μπορούν να εκμεταλλευτούν τη βαθμίδωση του pH.
(3) Η διέλευση πρωτονίων διαμέσου πρωτεϊνών που παράγουν ATP στην κυτταρική μεμβράνη συμβαίνει καθώς μετακινούνται προς το αλκαλικό νερό. Αυτό λειτουργεί μόνο όταν οι προκαρυώτες βρίσκονται στην διεπαφή ή κοντά σε αυτήν. Εάν ένα ρεύμα τους παρασύρει, η πηγή ενέργειας δεν είναι πλέον διαθέσιμη.
(4) Τα βιοφίλμ επιτρέπουν σε συστάδες προκαρυωτών να προσκολλώνται σε στερεές επιφάνειες κοντά στη διεπαφή, αυξάνοντας έτσι την ικανότητά τους να δεσμεύουν ενέργεια από τη βαθμίδωση του pH χωρίς να απομακρύνονται από τα ρεύματα νερού.
(5) Τα βιοφίλμ αυξάνονται σε μέγεθος μέχρι να φθάσουν στα χρήσιμα όρια της βαθμίδωσης πρωτονίων. Μόλις φτάσουν στο μέγιστο μέγεθος, ο ανταγωνισμός για ενέργεια ασκεί επιλεκτική πίεση στον πληθυσμό, ευνοώντας τη συνεργασία μεταξύ γειτονικών κυττάρων. Αυτή είναι επίσης μια πιθανή εξήγηση για το πώς οι ομάδες προκαρυωτικών σχημάτισαν ευκαρυωτικούς οργανισμούς.

**ΕΙΚΟΝΑ 1-14** Τα βιοϋμένια (biofilms) βοηθούν ομάδες προκαρυωτών να δεσμεύσουν χημική ενέργεια. Παρουσιάζεται ένα πιθανό σενάριο που προάγει την εξειδίκευση και τη συνεργασία σε ομάδες προκαρυωτών.

Ευτυχώς, ισχύει και εδώ η ίδια έννοια που συζητήσαμε για να εξηγήσουμε τον τρόπο ανταγωνισμού των πρώιμων πρωτοκυττάρων για να επιβιώσουν: η εξέλιξη μέσω της φυσικής επιλογής. Για να εξηγήσουμε πώς συνέβη αυτό, πρέπει να λάβουμε υπόψη τα ίδια τρία χαρακτηριστικά – παραλλαγή εντός ενός πληθυσμού, κληρονόμηση αυτής της παραλλαγής και ένα πλεονέκτημα επιβίωσης λόγω αυτής της παραλλαγής. Η παραλλαγή προκύπτει από δύο κύριες πηγές: εγγενή σφάλματα κατά την αντιγραφή του DNA και ανταλλαγή DNA μεταξύ των μελών ενός πληθυσμού.

Παρόλο που ο ορισμός της ζωής προϋποθέτει ότι ο οργανισμός διαθέτει ικανότητα αντιγραφής και αυτοεπιδιόρθωσης, κανένα από αυτά τα χαρακτηριστικά δεν χρειάζεται να είναι 100% ακριβές. Μια απλή αρχή της φυσικής είναι ότι η αταξία (εντροπία) σε οποιοδήποτε κλειστό σύστημα (όπως ένας οργανισμός και η πηγή ενέργειάς του) *πάντα* αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Σε αυτό το πλαίσιο, αυτό σημαίνει ότι τα κύτταρα ποτέ δεν αντιγράφουν το DNA τους τέλεια ούτε επιδιορθώνουν όλα τα λάθη τους. Τα σφάλματα κατά την αντιγραφή των γονιδίων αποτελούν μια πραγματικότητα. Επειδή το DNA αποθηκεύει γενετικές πληροφορίες, αυτή η παραλλαγή κληρονομείται από τους απογόνους ενός οργανισμού.

Οι προκαρυώτες ενισχύουν αυτή τη γενετική παραλλαγή καθώς μοιράζονται τμήματα του DNA τους με τους γείτονές τους, γεγονός το οποίο οι βιολόγοι ονομάζουν **οριζόντια μεταφορά γονιδίων**. Η οριζόντια μεταφορά γονιδίων επιταχύνει τον ρυθμό της εξελικτικής αλλαγής επιτρέποντας στα μέλη ενός πληθυσμού να μοιράζονται τα οφέλη της παραλλαγής χωρίς να χρειάζεται να την αναπτύξουν από μόνα τους. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα είναι η αντοχή στα αντιβιοτικά. Αν ένα βακτήριο μεταλλαχθεί και δεν είναι πλέον ευαίσθητο στα αντιβιοτικά φάρμακα, μπορεί να μεταβιβάσει γρήγορα αυτή τη γενετική πληροφορία στους γείτονές του αντιγράφοντας το DNA που κωδικοποιεί αυτή την αντοχή και μεταφέροντάς το με φυσικό τρόπο σε άλλα κύτταρα με τα οποία έρχεται σε επαφή. Αυτός ο τύπος μεταφοράς γονιδίων μπορεί να αλλάξει δραματικά τους πληθυσμούς των προκαρυωτικών οργανισμών, δημιουργώντας ακόμη και νέα είδη.

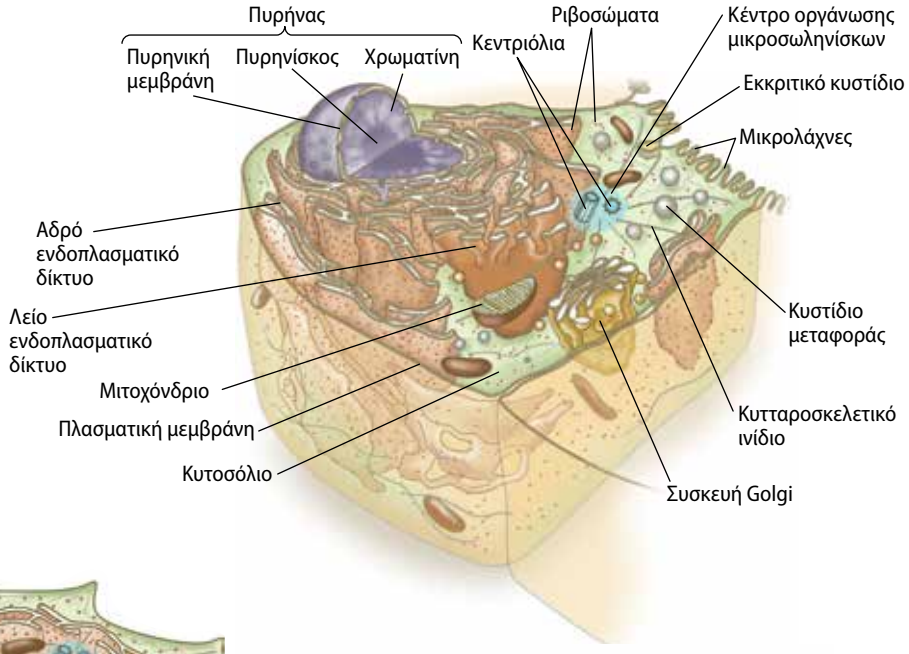
Το επιλεκτικό πλεονέκτημα της γενετικής παραλλαγής εντός ενός πληθυσμού, είναι επομένως ο παράγοντας που καθορίζει το πόσο καλά ανταγωνίζονται οι οργανισμοί μεταξύ τους. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε βιολογικούς κώδικες για να εξηγήσουμε αυτό το φαινόμενο. Όταν η γενετική παραλλαγή οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου ή τροποποιημένου βιολογικού κώδικα, αυτό μπορεί να παρέχει τεράστιο πλεονέκτημα έναντι οργανισμών που στερούνται αυτού του βιολογικού κώδικα. Ένα παράδειγμα είναι ο κώδικας που ονομάζεται **αίσθηση απαρτίας** (quorum sensing). Η αίσθηση απαρτίας είναι η βακτηριακή γλώσσα μέσω της οποίας επικοινωνούν οι μικροοργανισμοί μεταξύ τους για να ρυθμίσουν το μέγεθος των κοινοτήτων τους. Τα μόρια σηματοδότησης που ανταλλάσσονται μεταξύ των κυττάρων μπορούν να συμβάλλουν στον σχηματισμό βιοφίλμ, στη διαφοροποίηση αποικιών, στην προκαρυωτική κινητικότητα και στην παραγωγή παραγόντων λοιμογόνου δράσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, αυτή η κοινοτική διαβίωση είναι ζωτικής σημασίας για την επιβίωση ενός οργανισμού: ορισμένοι προκαρυώτες μπορούν να παραμείνουν ζωντανοί στην πλαγκτονική κατάσταση, αλλά μπορούν να αντιγραφούν μόνο όταν βρίσκονται σε συμβιωτικό περιβάλλον όπως σε ένα βιοφίλμ. Αυτή είναι η Πρώτη μας Αρχή στην πράξη: η συνεργασία προάγει την προκαρυωτική εξέλιξη αυξάνοντας τη γενετική ποικιλομορφία σε έναν πληθυσμό.

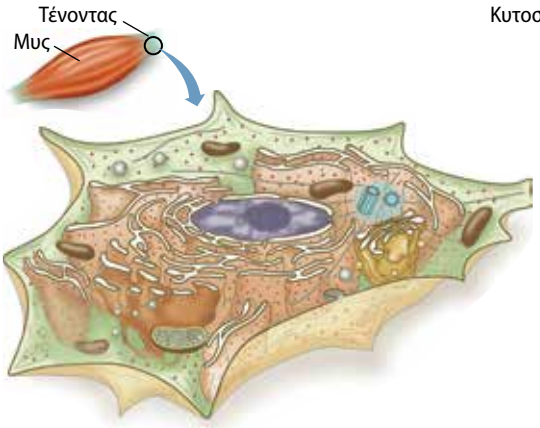
## Οι ευκαρυώτες είναι πολύπλοκα κύτταρα ικανά να σχηματίσουν πολυκύτταρους οργανισμούς

Τα ευκαρυωτικά κύτταρα αποτελούν την τρίτη και πιο πρόσφατη επικράτεια βιολογικών οργανισμών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-3. Μία καλλιτεχνική απεικόνιση της ποικιλίας των ευκαρυωτικών κυττάρων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1-15**. Όταν παρατηρούνται με μικροσκόπιο, το πιο εντυπωσιακό χαρακτηριστικό των ευκαρυωτικών κυττάρων είναι ότι το κυτταρόπλασμά τους είναι εξαιρετικά οργανωμένο. Ακόμη και το απλούστερο μικροσκόπιο αποκαλύπτει την παρουσία μιας

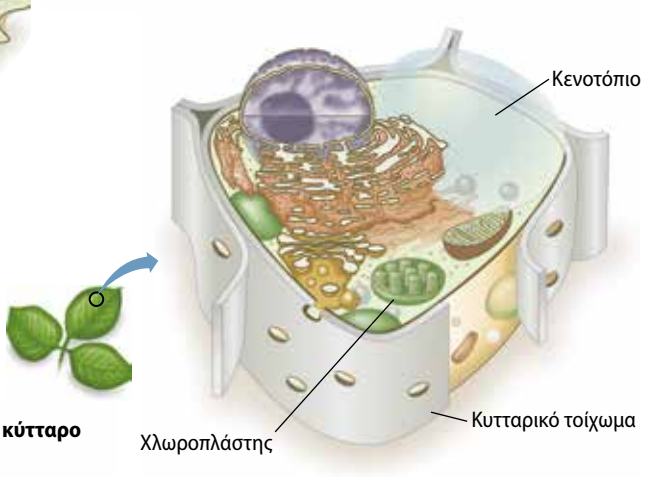



α) **Επιθηλιακό κύτταρο**

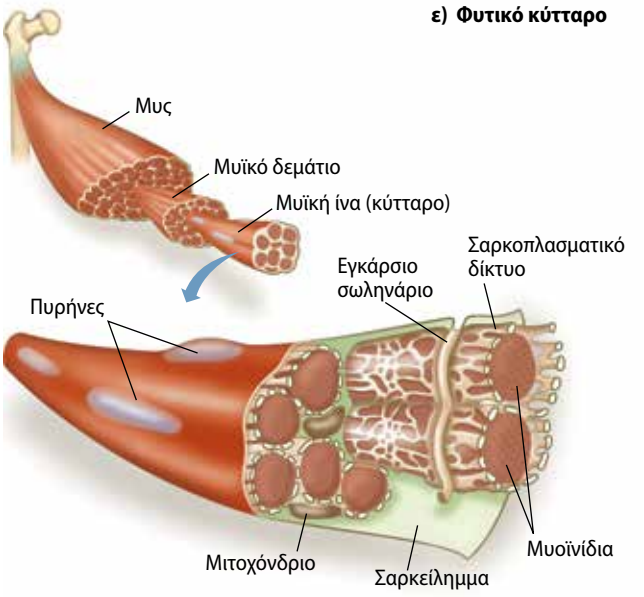


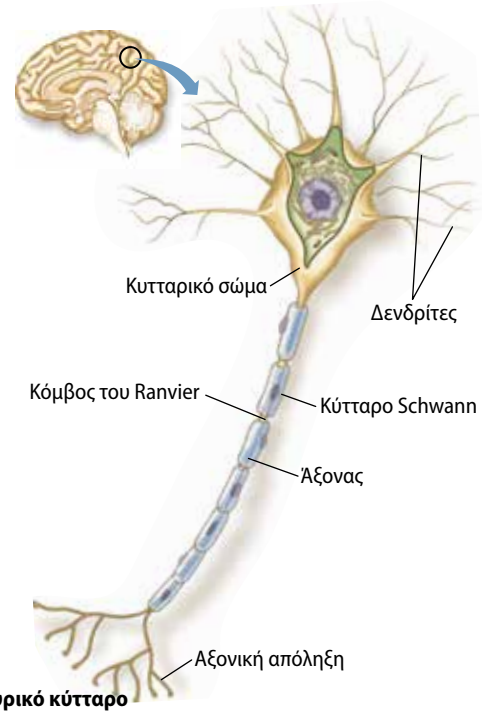

δ) **Ινοβλάστης**




ε) **Φυτικό κύτταρο**

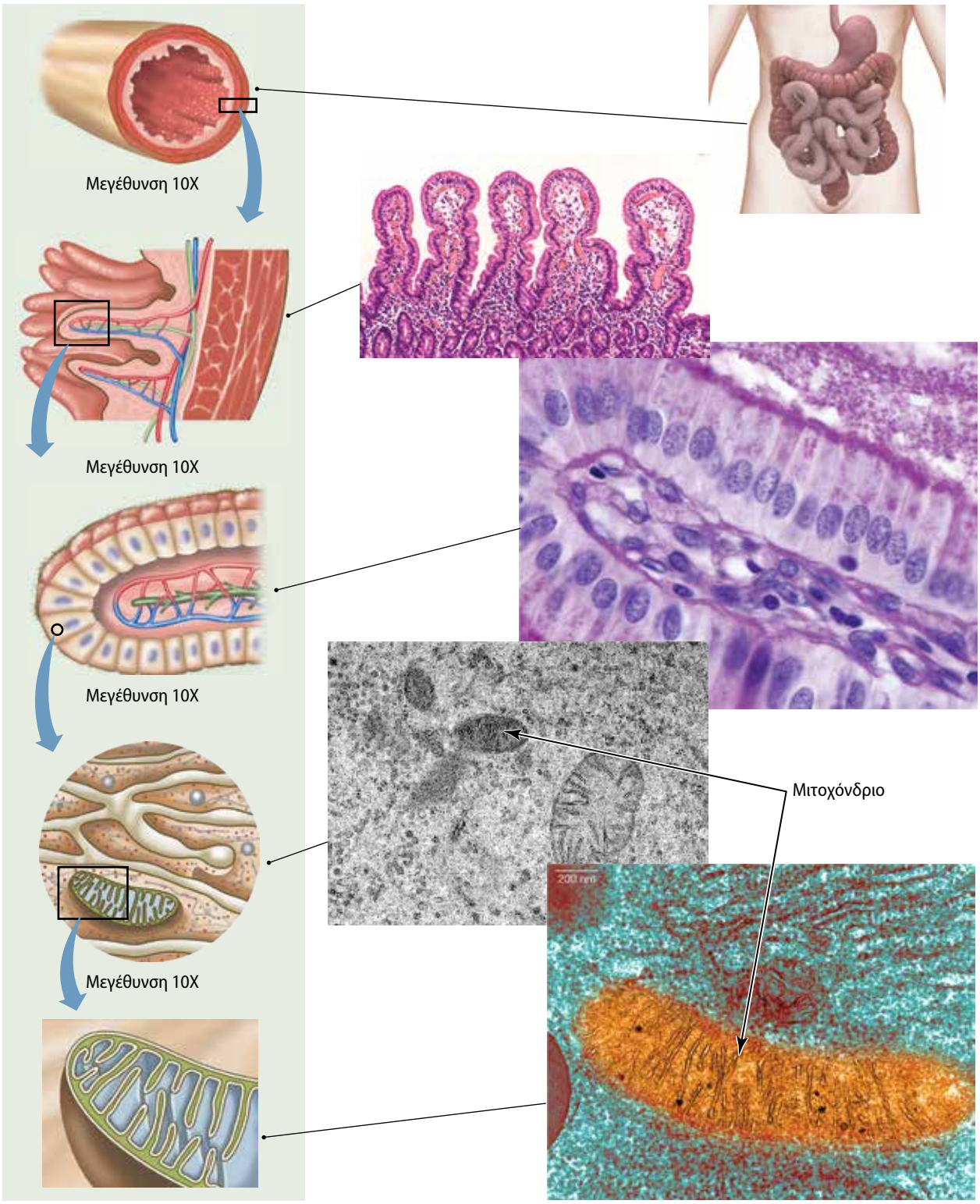



β) **Μυϊκό κύτταρο**




γ) **Νευρικό κύτταρο**

**ΕΙΚΟΝΑ 1-15** Παραδείγματα διαφορετικών τύπων ευκαρυωτικών κυττάρων, συμπεριλαμβανομένων των δομών που είναι ειδικές για κάθε τύπο.




**ΕΙΚΟΝΑ 1-16** Οι υποκυτταρικές δομές μπορούν να παρατηρηθούν με φωτονικά ή ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Η αύξηση της μεγέθυνσης αποκαλύπτει τη δομή ενός μεμονωμένου μιτοχονδρίου σε ένα ευκαρυωτικό κύτταρο στο έντερο.

Φωτογραφίες από πάνω προς τα κάτω: © Sebastian Kaulitzki/Shutterstock; © David Litman/Shutterstock; © Jose Luis Calvo Martin & Jose Enrique Garcia-Maurino Muzquiz/iStock /Getty Images; © Dlumen/iStock/Getty Images Plus/Getty Images; © Callista Images/Image Source/Getty Images.

μεγάλης, συχνά ωοειδούς δομής που ονομάζεται **πυρήνας**. Η προσεκτική εξέταση με πιο ισχυρά μικροσκόπια μας επιτρέπει να δούμε επιπλέον διακριτές δομές στο κυτοσόλιο, όπως τα μιτοχόνδρια (βλ. **Εικόνα 1-16**). Αυτές οι δομές γενικά ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Οι κυτταροπλασματικές δομές που περιβάλλονται από τουλάχιστον μία διακριτή μεμβράνη ονομάζονται **οργανίδια**. Η παρουσία αυτών των μεμβρανών επιτρέπει στο κύτταρο να δημιουργήσει εξειδικευμένα διαμερίσματα στο κυτταρόπλασμα που είναι αφιερωμένα στην εκτέλεση μιας υποομάδας κυτταρικών εργασιών υπό βέλτιστες συνθήκες. Όπως και η πλασματική μεμβράνη, οι μεμβράνες αυτές είναι επιλεκτικά διαπερατές σε ιόντα και άλλα μικρά μόρια, γεγονός που συμβάλλει στη δημιουργία ενός μοναδικού εσωτερικού περιβάλλοντος, ιδανικά προσαρμοσμένου στα μόρια που περιέχονται στο εσωτερικό του. Λόγω της μεμβράνης που τον περιβάλλει, ο πυρήνας ταξινομείται ως οργανίδιο. Άλλα οργανίδια που απαντώνται στα ευκαρυωτικά κύτταρα είναι το **ενδοπλασματικό δίκτυο**, η **συσκευή Golgi**, τα **μιτοχόνδρια**, οι **χλωροπλάστες**, τα **ενδοσώματα**, τα **λυσοσώματα** και τα **υπεροξειδιοσώματα**. Κάθε ένα από αυτά τα οργανίδια περιέχει μοναδικά μόρια και εκτελεί μια ξεχωριστή ομάδα λειτουργιών. Στη συνέχεια του βιβλίου θα μελετήσουμε λεπτομερώς τη δομή και τη λειτουργία αυτών των οργανιδίων.
- Μεγάλα μοριακά σύμπλοκα που *δεν* περικλείονται από ξεχωριστή μεμβράνη δεν διαθέτουν μια γενική ονομασία (όπως *οργανίδιο*), αλλά μοιράζονται ένα σημαντικό χαρακτηριστικό: αντιπροσωπεύουν εξειδικευμένες περιοχές στο κυτοσόλιο που είναι αφιερωμένες σε μια υποομάδα κυτταρικών εργασιών. Για παράδειγμα, τα ευκαρυωτικά κύτταρα περιέχουν τρεις διαφορετικούς τύπους ινιδίων που λειτουργούν ως ικρίωμα για την οργάνωση του κυτοσολίου, και για το λόγο αυτό αποκαλούνται **κυτταροσκελετός**. Η προσεκτική διάταξη του κυτταροσκελετού είναι ζωτικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία των κυττάρων. Χωρίς αυτόν, τα μυϊκά κύτταρα δεν θα μπορούσαν να συσπαστούν και τα νευρικά κύτταρα θα παρέμεναν αδρανή. Θα επικεντρωθούμε στον κυτταροσκελετό στο Κεφάλαιο 5 αλλά θα τον συναντούμε επανειλημμένα σε όλο το βιβλίο.

## Οι ευκαρυώτες προέκυψαν μέσω συνεργασίας μεταξύ προκαρυωτών

Το γεγονός ότι οι ευκαρυώτες προέκυψαν από ομάδες προκαρυωτών δεν αμφισβητείται στη βιολογία. Ωστόσο, το *πώς* συνέβη, εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο μεγάλης αντιπαράθεσης. Αρχικά, ας δούμε σε τι συμφωνούν όλοι οι επιστήμονες:

- Τα ευκαρυωτικά κύτταρα πήραν το όνομά τους επειδή ένα από τα πιο διακριτά χαρακτηριστικά τους, όταν παρατηρούνται στο μικροσκόπιο, είναι ο πυρήνας. (Το όνομα «ευκαρυώτης» προέρχεται από το ελληνικό *ευ-*, που σημαίνει «αληθής» και το *κάρυο*, που σημαίνει «πυρήνας». Για το λόγο αυτό, οι προκαρυώτες θεωρείται ότι έχουν προέλθει προ- ή *πριν* από την εμφάνιση του πυρήνα). Θα μπορούσε εύκολα να υποθέσει κανείς ότι η εμφάνιση του πυρήνα σηματοδότησε την αρχή της ευκαρυωτικής ζωής. Ωστόσο, το πρώτο οργανίδιο που εμφανίστηκε ήταν το μιτοχόνδριο. Αυτό συνέβη πριν από περίπου 1,8 δισεκατομμύρια χρόνια, σχεδόν 2 δισεκατομμύρια χρόνια μετά την εμφάνιση της ζωής στη Γη.
- Οι ευκαρυώτες έχουν, κατά μέσο όρο, τέσσερις φορές περισσότερο γενετικό υλικό σε σχέση με τα βακτήρια. Η μεγαλύτερη γνωστή ποσότητα DNA σε ένα ευκαρυωτικό κύτταρο είναι 10.000 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη γνωστή ποσότητα σε ένα προκαρυωτικό κύτταρο. Αυτό σημαίνει ότι τα ευκαρυωτικά κύτταρα περιέχουν περισσότερες γενετικές πληροφορίες από τους προκαρυώτες: Οι ευκαρυωτικοί οργανισμοί έχουν περισσότερες από 1.000 οικογένειες γονιδίων που απουσιάζουν από τους προκαρυωτικούς οργανισμούς. Αν χρησιμοποιήσουμε την «αναλογία: το κύτταρο ως πολυσύχναστη πόλη» από το Ένθετο 1-6, μπορούμε να πούμε ότι η βιβλιοθήκη σε ένα ευκαρυωτικό κύτταρο έχει μια μεγαλύτερη και πιο σύνθετη «συλλογή» σε σχέση με την αντίστοιχη προκαρυωτική βιβλιοθήκη. Αυτό είναι πολύ σημαντικό επειδή εξηγεί για ποιο λόγο οι ευκαρυώτες είναι πολύ πιο πολύπλοκοι από δομική άποψη σε σχέση με τους προκαρυώτες: έχουν περισσότερες πληροφορίες για να εργαστούν.
- Τα ευκαρυωτικά κύτταρα είναι κατά μέσο όρο 10 έως 100 φορές μεγαλύτερα από τα προκαρυωτικά κύτταρα. Ενώ το ίδιο το μέγεθος δεν προσδίδει απαραίτητα κάποιο ειδικό πλεονέκτημα

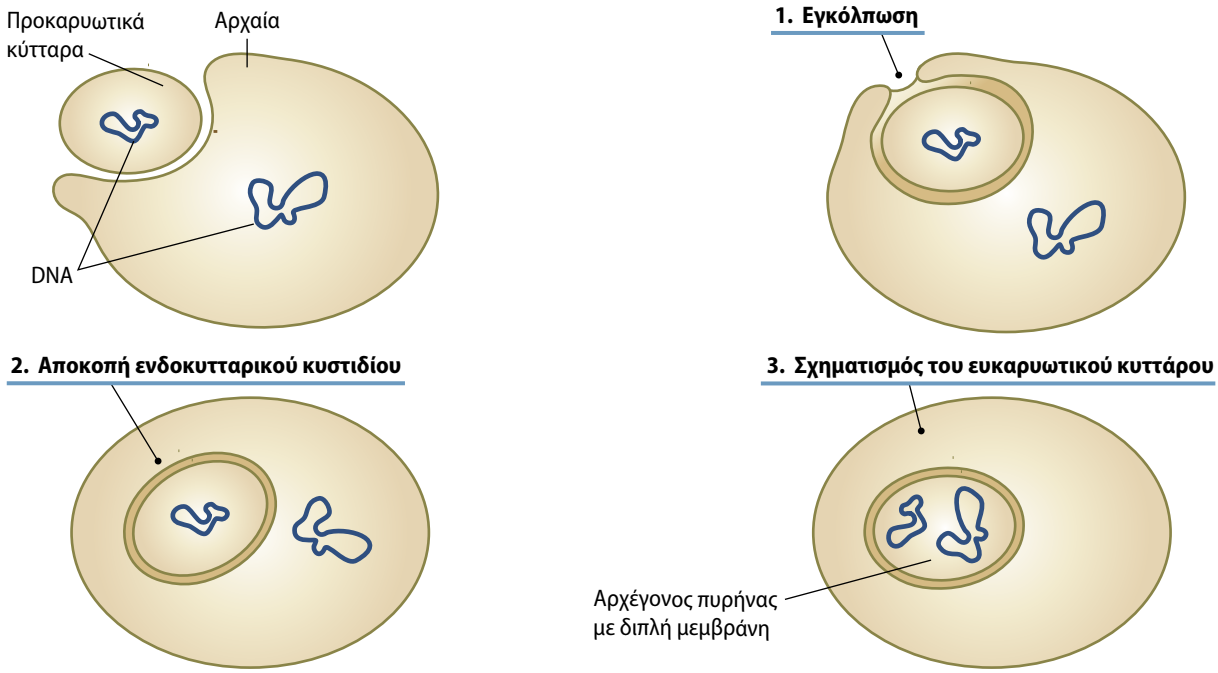
στους ευκαρυώτες, το μεγαλύτερο μέγεθός τους αντικατοπτρίζει την αυξημένη δομική σταθερότητά τους, η οποία μπορεί να αποτελέσει τεράστια βοήθεια. Αν δανειστούμε την αναλογία της πολυσύχναστης πόλης, μπορούμε να πούμε ότι οι ουρανοξύστες είναι πολύ πιο σύνθετοι από τα απλά στοιβαγμένα μικρά κτίρια: χρειάζονται ειδικές δομές που τους επιτρέπουν να παραμένουν λειτουργικοί υπό συνθήκες που θα κατέστρεφαν απλές ομάδες μικρών κτιρίων (ή κυττάρων).

Υπάρχουν πολλά που πρέπει να εξηγηθούν προκειμένου να κατανοήσουμε πλήρως την ευκαρυωτική εξέλιξη, αναδύονται ωστόσο κοινά μοτίβα. Για παράδειγμα, με βάση την προσεκτική εξέταση των αλληλουχιών του DNA στον πυρήνα και τη μικρή ποσότητα DNA που παραμένει στο μιτοχόνδριο, οι βιολόγοι έχουν διαπιστώσει ότι το μεγαλύτερο μέρος του πυρηνικού DNA προέρχεται από ένα αρχαιοβακτήριο και το μιτοχονδριακό DNA προέρχεται από ένα τύπο βακτηρίου που ονομάζεται άλφα-πρωτεοβακτήριο. Αυτό ενισχύει την πεποίθηση ότι οι ευκαρυωτικοί οργανισμοί εμφανίστηκαν όταν ένα αρχαιοβακτήριο «κύτταρο-ξενιστής» εγκόλπωσε ένα βακτήριο που ήταν ικανό να παράγει περισσότερο ATP από όσο χρειαζόταν για να επιβιώσει. Αυτό το βακτήριο έγινε το μιτοχόνδριο. Αυτή η εξήγηση είναι γνωστή ως **ενδοσυμβιωτική θεωρία** ή **ενδοσυμβίωση**. (Το 2015, οι επιστήμονες ανακάλυψαν ένα αρχαιοβακτήριο που ονομάζεται Lokiarcheaota, το οποίο έχει εντυπωσιακά γενετική ομοιότητα με το προτεινόμενο προγονικό αρχαιοβακτήριο). Όλοι οι ευκαρυώτες μοιράζονται αυτή τη γενετική καταγωγή, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι ο σχηματισμός του μιτοχονδρίου συνέβη μόνο μια φορά κατά τη διάρκεια της εξέλιξης. Το *πότε* και το *πώς ακριβώς* συνέβη αυτό, είναι επί του παρόντος θέμα συζήτησης.

Γνωρίζουμε ότι αυτό συνέβη πριν από τον σχηματισμό του πυρήνα επειδή η δομή και η μοριακή σύσταση της μεμβράνης που περιβάλλει τον πυρήνα (πυρηνικός φάκελος) σε όλους τους ευκαρυώτες μοιάζει περισσότερο με τη βακτηριακή μεμβράνη παρά με τις μεμβράνες των αρχαιοβακτηρίων (**Εικόνα 1-17**) και η πηγή αυτής της βακτηριακής μεμβράνης είναι κατά πάσα πιθανότητα το προγονικό μιτοχόνδριο. (Μια εναλλακτική υπόθεση είναι ότι ο πρώιμος ευκαρυώτης εγκόλπωσε ένα δεύτερο βακτήριο που οδήγησε στην πυρηνική μεμβράνη). Γνωρίζουμε επίσης ότι αυτό το γεγονός πυροδότησε τον «καταμερισμό της εργασίας» που οδήγησε στην Πρώτη μας Αρχή: μετά την εγκόλπωσή του, το μιτοχόνδριο δεν χρειαζόταν πλέον να μετακινείται στο περιβάλλον (π.χ. να κολυμπάει), να βρίσκει τροφή ή να αμύνεται έναντι επιθέσεων. Το γεγονός αυτό του επέτρεψε να εξειδικευτεί στη δημιουργία ATP. Με τη σειρά του, το κύτταρο ξενιστής δεν χρειαζόταν πλέον να δεσμεύει την πλασματική μεμβράνη του στη σύνθεση ATP, αντ' αυτού, μπορούσε να εξειδικευτεί περαιτέρω σχηματίζοντας σταθερές συνδέσεις με το περιβάλλον του, συμπεριλαμβανομένων και

### ? ΕΝΘΕΤΟ 1-13 ΣΥΧΝΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ: **Η αβεβαιότητα ως προς τον μηχανισμό της εξέλιξης αποτελεί απόδειξη ότι δεν υπάρχει εξέλιξη;**

Σίγουρα όχι. Οι ενδείξεις ότι η εξέλιξη συμβαίνει και έχει συμβεί από την εμφάνιση της ζωής στη Γη, είναι εντυπωσιακές. Μπορούμε να παρατηρήσουμε την εξέλιξη να συμβαίνει γύρω μας. Η εμφάνιση διαφορετικών στελεχών του ιού της γρίπης κάθε χρόνο αποτελεί σαφή ένδειξη ότι το γενετικό υλικό (DNA ή RNA) των ιών αλλάζει πολύ γρήγορα και ότι οι παραλλαγές που προσβάλλουν τους ανθρώπους πολλαπλασιάζονται και μας προκαλούν ασθένειες. Αυτή η συνεχής γενετική διαφοροποίηση παρατηρείται σε όλους τους οργανισμούς και αποδεικνύεται εύκολα μέσω της σύγκρισης της νουκλεοτιδικής αλληλουχίας του DNA ή RNA στους οργανισμούς με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, δεν είναι ακόμη απολύτως σαφές *για ποιο λόγο* εμφανίζεται μια συγκεκριμένη παραλλαγή σε έναν συγκεκριμένο οργανισμό και σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μη πλήρης κατανόηση των μηχανισμών που δημιουργούν μια συγκεκριμένη γενετική παραλλαγή δεν ελαττώνει την ισχύ των ενδείξεων ότι αυτή έχει συμβεί.




**ΕΙΚΟΝΑ 1-17** Ο πυρήνας προέκυψε μέσω ενδοσυμβίωσης, μια διαδικασία κατά την οποία ένα προκαρυωτικό κύτταρο εγκολπώνει ένα άλλο σχηματίζοντας ένα αρχέγονο οργανίδιο όπως ο πυρήνας.

των γειτονικών κυττάρων. Η συνεργασία μεταξύ των αρχαιοβακτηρίων και των βακτηρίων σφραγίστηκε έτσι με τη μορφή μιας νέας βιολογικής επικράτειας, των Ευκαρυωτών.

Ένα δεύτερο κοινό μοτίβο στις θεωρίες για την προέλευση των ευκαρυωτών είναι ότι τα μιτοχόνδρια εμφανίστηκαν πολύ πριν αρχίσουν να λειτουργούν με τον τρόπο που λειτουργούν τα περισσότερα σύγχρονα μιτοχόνδρια. Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 10, τα σύγχρονα μιτοχόνδρια βασίζονται στο οξυγόνο (αέριο $O_2$) ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων κατά τη μετατροπή της ενέργειας της τροφής σε ATP. Η στέρηση οξυγόνου στους αερόβιους ευκαρυώτες μπορεί να αποβεί μοιραία. Αλλά κατά την χρονική περίοδο εμφάνισης των πρώτων μιτοχονδρίων, τα επίπεδα του ατμοσφαιρικού οξυγόνου ήταν πολύ χαμηλότερα από τα σημερινά επίπεδα. Τι χρησιμοποιούσαν, λοιπόν, τότε τα μιτοχόνδρια αντί για οξυγόνο; Και πάλι, η γενετική μας βοηθά να λύσουμε αυτό το γρίφο: τα βακτήρια που ζουν σήμερα σε περιβάλλοντα φτωχά σε οξυγόνο χρησιμοποιούν πρωτεΐνες που προέρχονται από γονίδια πολύ παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούν τα μιτοχόνδρια για τη δημιουργία ATP, αλλά αυτά τα φτωχά σε οξυγόνο βακτήρια υποκαθιστούν το οξυγόνο με άλλα βιολογικά μόρια ή ακόμα και απλά ιόντα υδρογόνου. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι εφόσον τα σύγχρονα βακτήρια χρησιμοποιούν τα ίδια γονίδια με τα πρώιμα μιτοχόνδρια για τη δημιουργία ATP απουσία οξυγόνου, αυτό θα μπορούσαν να κάνουν επίσης και τα πρώτα μιτοχόνδρια. Αυτό σημαίνει ότι τα πρώιμα μιτοχόνδρια ήταν εξαιρετικά προσαρμοστικά ώστε να χρησιμοποιούν δέκτες ηλεκτρονίων, εναλλακτικούς του οξυγόνου, και ότι αργότερα απέκτησαν την ικανότητα να χρησιμοποιούν οξυγόνο όταν αυτό έγινε διαθέσιμο. (Κάποιοι σύγχρονοι οργανισμοί μπορούν να χρησιμοποιούν τόσο το οξυγόνο όσο και τις εναλλακτικές επιλογές). Επειδή δεν διαθέτουμε καμία άμεση απόδειξη ότι αυτό συνέβη, το συγκεκριμένο σημείο παραμένει ανοιχτό σε εικασίες.

Ένα τρίτο κοινό στοιχείο σε όλα τα μοντέλα ευκαρυωτικής εξέλιξης είναι ότι το πρώτο ευκαρυωτικό κύτταρο διέθετε περίπου τα διπλάσια γονίδια από τους προκαρυωτικούς γείτονές του. Επειδή λοιπόν πολλά από τα γονίδια των Αρχαίων αρχικά εκτελούσαν σχεδόν τις ίδιες λειτουργίες με τα αντίστοιχα γονίδια του βακτηριακού προγόνου, πολλά από τα γονίδια του ευκαρυωτικού DNA (το σύνολο όλων των γενετικών πληροφοριών σε έναν οργανισμό ονομάζεται **γονιδίωμα**) ήταν πλεονάζοντα. Από εξελικτικής άποψης, αυτό είναι σημαντικό επειδή παρέχει την εξαιρετική ευκαιρία

στο ευκαρυωτικό κύτταρο να μεταλλάξει το γονιδίωμά του χωρίς το φόβο εξαφάνισης. Με απλά λόγια, ο πρώτος ευκαρυώτης μπορούσε να αντέξει τη μετάλλαξη ενός εκ των γονιδίων του εάν το «συγγενικό» γονίδιο παρέμενε άθικτο και λειτουργικό – αυτό το γενετικό πλεόνασμα σήμαινε ότι θα μπορούσαν να γίνουν πολλά λάθη. Αυτή η ικανότητα επέτρεψε μεγάλη ποικιλία, συμπεριλαμβανομένων νέων γονιδίων που δεν υπήρχαν προηγουμένως στους προκαρυώτες. Για παράδειγμα, πάνω από 280 οικογένειες νέων γονιδίων προέκυψαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, που περιείχαν αλληλουχίες τόσο των αρχαίων όσο και των βακτηρίων, καταδεικνύοντας ότι αποτελούν το προϊόν της σύντηξης πολλαπλών γονιδίων. Δεν επιβίωσαν όλα τα γονίδια κατά τη διαδικασία της επιλογής: στους σύγχρονους ευκαρυώτες λείπουν κάποια από τα γονίδια των προγονικών κυττάρων τους και κάποια βακτηριακά γονίδια έχουν μετακινηθεί από το μιτοχονδριακό DNA στα πυρηνικά χρωμοσώματα κατά τη διάρκεια των τελευταίων δισεκατομμυρίων ετών. Τα περισσότερα σύγχρονα ευκαρυωτικά γονιδιώματα περιλαμβάνουν ακόμη και κάποια από τα «αποτυχημένα» (μη λειτουργικά) γονίδια που κληρονομήθηκαν από αυτές τις ταραχώδεις περιόδους. Ακριβώς *πώς* αυτός ο πολλαπλασιασμός γενετικής ποικιλομορφίας διαμορφώθηκε με την πάροδο του χρόνου παραμένει ασαφές και ανοιχτό για ερμηνεία βάσει των διαφορετικών μοντέλων της ευκαρυωτικής εξέλιξης.

Τέταρτον, η ομαδική συνεργασία ως απόκριση στη φυσική επιλογή οδήγησε σε μεγαλύτερο καταμερισμό εργασίας με την πάροδο του χρόνου. Με βάση την προσεκτική ανάλυση της γενετικής ιστορίας των πρωτεϊνών που σχετίζονται με συγκεκριμένα οργανίδια και κυτταρικές λειτουργίες, μπορούμε τώρα να προτείνουμε μια λογική εξήγηση του τρόπου ανάπτυξης των οργανιδίων και άλλων εξειδικεύσεων. Για παράδειγμα, τα οργανίδια και τα κυστίδια που απαρτίζουν το ενδομεμβρανικό σύστημα (καλύπτεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 9) προέκυψαν από τη μιτοχονδριακή μεμβράνη, ενώ ο μοριακός μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της διακίνησης μέσω των μεμβρανών σε αυτό το σύστημα προέκυψε από το προγονικό αρχαιοβακτήριο. Παρομοίως, οι πρωτεΐνες που είναι υπεύθυνες για την αντιγραφή και επεξεργασία του DNA και του RNA στον πυρήνα (συζητείται στα Κεφάλαια 7 και 8) προέρχονται από τα αρχαία, ενώ ο μηχανισμός μετατροπής των γενετικών πληροφοριών σε πρωτεΐνες στο κυτοσόλιο (ονομάζεται *μετάφραση*, καλύπτεται στο Κεφάλαιο 8) έχει βακτηριακή προέλευση.

Η επέκταση της πυρηνικής μεμβράνης οδήγησε στη δημιουργία του ενδοπλασματικού δικτύου. Όταν τα κυανοβακτήρια απέκτησαν την ικανότητα να αξιοποιούν το ηλιακό φως ως πηγή ενέργειας, απελευθέρωσαν μοριακό οξυγόνο στην ατμόσφαιρα ως προϊόν της φωτοσύνθεσης. (Ορισμένοι ευκαρυώτες στη συνέχεια εγκόλπωσαν αυτά τα κυανοβακτήρια, οδηγώντας στην εμφάνιση των χλωροπλαστών και τελικά των φυτών). Όταν τα επίπεδα του ατμοσφαιρικού οξυγόνου αυξήθηκαν τόσο ώστε να αποτελούν κίνδυνο λόγω των δραστικών μορφών οξυγόνου (π.χ. υπεροξείδιο [$O^{2-}$] και υπεροξείδιο του υδρογόνου [$H_2O_2$]), που μπορούν να προκαλέσουν βλάβη σε DNA και πρωτεΐνες, η μιτοχονδριακή μεμβράνη εκβλάστησε για να δημιουργήσει το υπεροξειδιόσωμα, ένα οργανίδιο που εξουδετερώνει αυτές τις επικίνδυνες ενώσεις. Η απειλή βλάβης από τις ρίζες οξυγόνου ενδέχεται να οδήγησε στην ανάπτυξη άλλων οργανιδίων, όπως ο πυρήνας, ο οποίος προστατεύει το DNA από την πρόκληση βλάβης. Επειδή αυτά τα ενδιάμεσα στάδια δεν έχουν επιβιώσει, δεν μπορούμε να καθορίσουμε με βεβαιότητα την ακριβή αλληλουχία των γεγονότων που οδήγησαν στην εμφάνιση αυτών των ευκαρυωτικών εξειδικεύσεων.

Το πέμπτο μοτίβο στην ευκαρυωτική εξέλιξη είναι ότι, ανεξάρτητα από το πόσες φορές έχουν συμβεί αυτά τα γεγονότα, μόνο ένας ευκαρυωτικός πρόγονος επιβίωσε και ο οποίος είχε κοινά όλα αυτά τα στοιχεία με κάθε μεταγενέστερο ευκαρυώτη. Αυτός ο οργανισμός είναι σήμερα γνωστός ως ο **τελευταίος ευκαρυωτικός κοινός πρόγονος**, ή **LECA**. (Θυμηθείτε ότι ο LUCA οδήγησε στον LECA). Ενώ η ιστορική του ύπαρξη είναι αδιαμφισβήτητη, είναι απίθανο να βρούμε ποτέ ένα ζωντανό παράδειγμά του. Καθώς μαθαίνουμε περισσότερα για την εξέλιξη των ευκαρυωτών, θα αλλάξει πιθανότατα και ο ορισμός του LECA. Ήδη εφαρμόζουμε τις γνώσεις μας για να αναπτύξουμε νέες μορφές ζωής στο εργαστήριο (βλ. Πλαίσιο 1-14).

## ΕΝΘΕΤΟ 1-14 **Τεχνητά κύτταρα ευκαρυωτικού τύπου στον ορίζοντα**

Οι εξελίξεις στη βιοτεχνολογία, ιδιαίτερα στη γενετική μηχανική, έφεραν την επανάσταση τη δεκαετία του 1980. Μας επέτρεψαν να χρησιμοποιούμε ιούς και βακτήρια για να σώζουμε ανθρώπινες ζωές, να αυξάνουμε την απόδοση των καλλιεργειών, να ταυτοποιούμε εγκληματίες ή να επιλύουμε υποθέσεις πατρότητας. Όπως τα αυτοκινούμενα οχήματα αναμένεται να κυκλοφορούν στους δρόμους μαζί με τα «συμβατικά» οχήματα στο κοντινό μέλλον, έτσι και τα τεχνητά κύτταρα αναμένεται σύντομα να εισέλθουν στον βιολογικό κόσμο μαζί με τα φυσικά κύτταρα. Αξιοποιώντας τις έννοιες που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, οι επιστήμονες μπορούν πλέον να συνθέσουν βιώσιμα κύτταρα από μη ζωντανές πρώτες ύλες. Τα περισσότερα από αυτά τα τεχνητά κύτταρα μοιάζουν με απλούς προκαρυώτες και διαθέτουν την ικανότητα αναπαραγωγής και εκτέλεσης βασικών λειτουργιών που απαιτούνται για τη διατήρηση της ζωής και την αναπαραγωγή. Στο μέλλον, τέτοια κύτταρα θα μπορούσαν να σχεδιαστούν για την αντικατάσταση φυσικών κυττάρων που έχουν υποστεί βλάβη (π.χ. τεχνητά ερυθρά αιμοσφαίρια) ή ως μέσα χορήγησης για στοχευμένη θεραπεία (π.χ. φορείς φαρμάκων).

Μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε το 2018 επιτρέπει στους επιστήμονες να δημιουργούν τεχνητά κύτταρα που περιέχουν φυσιολογικά ευκαρυωτικά κύτταρα στο εσωτερικό τους, τα οποία λειτουργούν ως «οργανίδια». Η μεμβράνη του τεχνητού κυττάρου προστατεύει αυτά τα φυσιολογικά κύτταρα από τις αντίξοες συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος, ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες, περίπου όπως η διαστημική στολή προστατεύει έναν αστροναύτη κατά τη διάρκεια ενός περιπάτου στο διάστημα. Προστατεύει επίσης από φυσική βλάβη, όπως η πλασματική μεμβράνη προστατεύει τα οργανίδια ή το κρανίο προστατεύει τον εγκέφαλο. Ακόμα κι αν εκτεθούν σε εξαιρετικά τοξικά, συμπυκνωμένα διαλύματα χαλκού, τα κύτταρα που ζουν στο εσωτερικό δεν επηρεάζονται, χάρη στην εξωτερική πανοπλία τους: το τεχνητό κύτταρο που τα προστατεύει.

Τροποποιημένο από Elani Y., et al., Constructing vesicle-based artificial cells with embedded living cells as organelle-like modules. *Scientific Reports* 2018 Mar 14;8(1):4564. doi: 10.1038/s41598-018-22263-3

## Τα βιοφίλμ υποστηρίζουν την προκαρυωτική και ευκαρυωτική συμβίωση

Τα βιοφίλμ προάγουν τη συνεργασία, και όχι μόνο μεταξύ των προκαρυωτών. Περιλαμβάνουν επίσης ευκαρυώτες όπως τα φύκη και οι μύκητες. Η εξέλιξη τεχνολογιών υψηλής απόδοσης για τον προσδιορισμό της αλληλουχίας του DNA στις αρχές του 21ου αιώνα επιτρέπει στους επιστήμονες να συγκρίνουν γονιδιώματα οργανισμών που μοιράζονται κοινά ενδιαιτήματα.

Αυτές οι **μεταγονιδιωματικές μελέτες** αποκαλύπτουν την παρουσία μεγάλης ποικιλίας μικροοργανισμών στις βιομεμβράνες, συμπεριλαμβανομένου ενός ποικίλου φάσματος ευκαρυωτών και βακτηρίων. Κάποια από αυτά τα βιοφίλμ σχηματίζονται στον ανθρώπινο οργανισμό, συμπεριλαμβανομένων των επιφανειών του αναπνευστικού και του πεπτικού μας συστήματος.

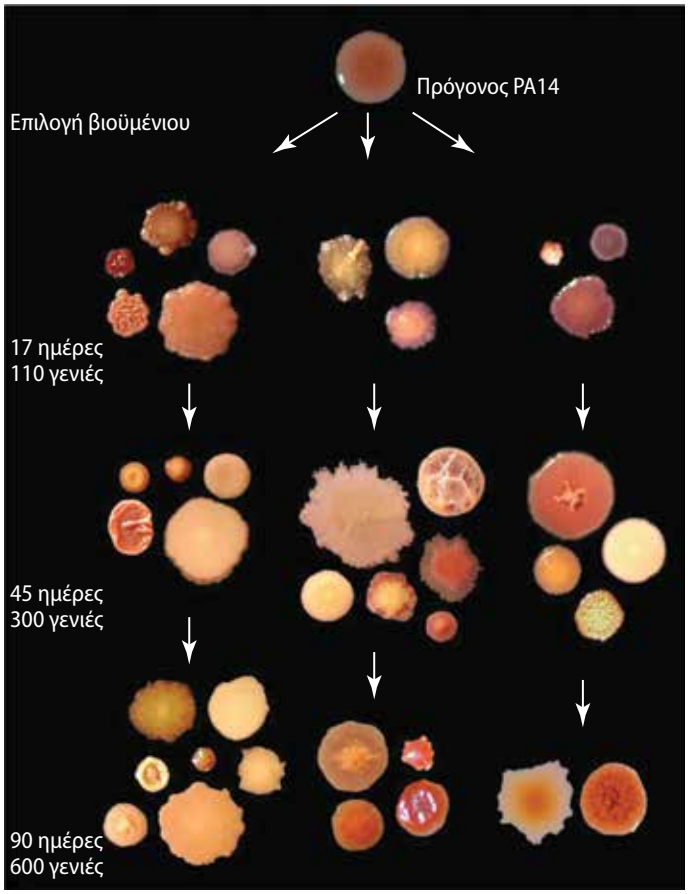
Ο τρόπος με τον οποίο αλλάζουν οι οργανισμοί μέσα σε ένα βιοφίλμ με την πάροδο του χρόνου μπορεί να μας πει πολλά για τις εξελικτικές πιέσεις που κατευθύνουν τη βιολογική συνεργασία. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα βιοφίλμ είναι πληθυσμοί οργανισμών με περιορισμένους πόρους που πρέπει να συνεργαστούν και να ανταγωνιστούν για να επιβιώσουν, επομένως παρέχουν μια εξαιρετική ευκαιρία για τη μελέτη της συνεργασίας και του ανταγωνισμού μεταξύ των πληθυσμών σε ένα μοναδικό ενδιαίτημα. Για παράδειγμα, ένα στέλεχος μικροοργανισμών μπορεί να τροποποιήσει το περιβάλλον του βιοφίλμ προκειμένου ένα δεύτερο στέλεχος να επιβιώσει ή να εξαφανιστεί. Τα κύτταρα που βρίσκονται στο εσωτερικό του βιοφίλμ μπορεί να ανταγωνίζονται επιτυχώς για χώρο παράγοντας ουσίες που περιορίζουν την ανάπτυξη ή αποτρέπουν την προσκόλληση άλλων κυττάρων. Άλλες φορές, για εξοικονόμηση ενέργειας, τα κύτταρα στα βιοφίλμ μπορεί

να σταματήσουν να παράγουν συγκεκριμένες ουσίες. Ενώ αυτό βοηθά τους ήδη παρόντες οργανισμούς, θα μπορούσε να δυσκολέψει την επιβίωση των νεοαφιχθέντων μελών.

Η κινητήρια δύναμη της εξέλιξης των βιοφίλμ και της συμβίωσης είναι, βεβαίως, η γενετική παραλλαγή. Για παράδειγμα, ένα στέλεχος βακτηρίων των βιομεμβρανών μπορεί να αναπτύξει ελαττωματικούς μηχανισμούς επιδιόρθωσης του DNA, καθιστώντας τα πιο ευαίσθητα σε μεταλλάξεις. Ενώ αυτό μπορεί να αποδειχθεί επικίνδυνο για ένα μεμονωμένο άτομο του πληθυσμού, ο αυξημένος ρυθμός μεταλλάξεων μπορεί να ωφελήσει ολόκληρη τη βιομεμβράνη, και με υποστήριξη, ακόμη και τα μεταλλαγμένα κύτταρα μπορεί να επιβιώσουν. Αυτή η λογική είναι παρόμοια με το επιχείρημα που υποστηρίζει την αυξημένη ανοχή στις μεταλλάξεις στους ευκαρυώτες. Η ύπαρξη υγιών γονιδίων που δεν έχουν υποστεί βλάβη σε γειτονικά κύτταρα αυξάνει την ανθεκτικότητα στις μεταλλάξεις, με μια προϋπόθεση: τα μεταλλαγμένα κύτταρα πρέπει να παραμείνουν στη βιομεμβράνη προκειμένου να επιβιώσουν. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεταλλάξεις που ευνοούν τη μακροχρόνια σταθερότητα εντός μιας βιομεμβράνης, όπως η αίσθηση απαρτίας, η αντοχή στα αντιβιοτικά, η αυξημένη κινητικότητα και η ενισχυμένη προσκόλληση στη μήτρα της βιομεμβράνης.

Ένα εξαιρετικό παράδειγμα ανταγωνισμού μεταξύ των οργανισμών αποκαλείται απλώς παρασιτισμός. Εντός ενός βιοφίλμ τα παρασιτικά κύτταρα, αναπτύσσουν μεθόδους για να επωφεληθούν από το περιβάλλον του βιοφίλμ, αλλά δεν προσφέρουν τίποτα σε αντάλλαγμα. Η γενετική παραλλαγή σε ένα βιοφίλμ επιτρέπει σε ορισμένα κύτταρα να αντεπιτεθούν αναπτύσσοντας μηχανισμούς που καθιστούν πιο δύσκολο τον παρασιτισμό. Ένα παράδειγμα είναι η έκκριση μιας πυκνότερης μήτρας βιοφίλμ, η οποία υποστηρίζει τα κύτταρα εντός της κοινότητας, περιορίζει τη διάχυση θρεπτικών συστατικών στα παρασιτικά κύτταρα και αποτρέπει ακόμη και την προσκόλληση νεοαφιχθέντων παρασιτικών κυττάρων.

Η συνεργασία εντός των βιοφίλμ μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα υγείας στους ανθρώπους. Για παράδειγμα, οι ασθενείς με τη γενετική νόσο κυστική ίνωση εκκρίνουν ένα παχύρευστο, κολλώδες στρώμα βλέννας στους πνεύμονες, στο πάγκρεας και σε άλλα όργανα. Αυτοί οι ασθενείς διατρέχουν κίνδυνο εμφάνισης σοβαρής πνευμονικής λοίμωξης επειδή τα βακτήρια χρησιμοποιούν τη βλέννα ως μήτρα για τη δημιουργία βιοφίλμ. Καθώς τα βακτήρια μεταλλάσσονται εντός αυτής της βλέννας, μπορούν να εμφανίσουν αντοχή στα αντιβιοτικά, καθιστώντας δύσκολη την




**ΕΙΚΟΝΑ 1-18** Επαγόμενη εξέλιξη του βακτηρίου *Pseudomonas aeruginosa* που σχηματίζει βιοφίλμ. Τρεις καλλιέργειες που ελήφθησαν από τον προγονικό πληθυσμό PA14 αναπτύχθηκαν για 90 ημέρες ως βιοφίλμ, με δειγματοληψία στις 17, 45 και 90 ημέρες. Παρατηρήστε την τεράστια διαφορά στο μέγεθος, το σχήμα και το χρώμα των βιοφίλμ των απογόνων. Ορισμένοι από αυτούς τους απογόνους αποδείχθηκαν πολύ πιο επιτυχημένοι στη δημιουργία βιοφίλμ από τον πρόγονο.

Αναπαραγωγή από Flynn KM, Dowell G, Johnson TM, Koestler BJ, Waters CM, Cooper VS. 2016. Evolution of ecological diversity in biofilms of *Pseudomonas aeruginosa* by altered cyclic diguanylate signaling. *J Bacteriol* 198:2608–2618. doi:10.1128/JB.00048-16

καταπολέμηση της λοίμωξης. Η **Εικόνα 1-18** δείχνει τα αποτελέσματα ενός πειράματος όπου ένα κοινό βακτήριο που απαντάται σε βιοφίλμ των ανθρώπινων πνευμόνων, το *Pseudomonas aeruginosa*, αφέθηκε να εξελιχθεί για διάστημα 90 ημερών (περίπου 600 γενιές) ως πληθυσμός βιομεμβράνης. Παρατηρήστε ότι τα τρία δείγματα του προγονικού πληθυσμού εξελίχθηκαν σε πολύ διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, αντικατοπτρίζοντας την τεράστια γενετική ποικιλομορφία εντός του προγονικού πληθυσμού. Μεταγενέστερες δοκιμές επιβεβαίωσαν ότι κάποια από αυτά τα στελέχη-απόγονοι ήταν πολύ πιο ανταγωνιστικά (δηλ. αναπτύσσονταν ταχύτερα) σε σχέση με τους «εγγενείς» πληθυσμούς *Pseudomonas aeruginosa* των βιοφίλμ.

Με τη σειρά τους, οι ερευνητές χρησιμοποιούν πειραματικά μοντέλα, όπως εκείνο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-18, για να μελετήσουν πώς εμφανίζεται η ανθεκτικότητα στα φάρμακα και να εξετάσουν θεραπείες για την απομάκρυνση αυτών των βακτηρίων από τον οργανισμό. Σε αυτήν την περίπτωση, ανταγωνιζόμαστε τις ίδιες δυνάμεις που οδήγησαν στη δική μας ποικιλομορφία και τα βακτήρια που καταπολεμούμε έχουν μακρά ιστορία εξέλιξης στην υπέρβαση τέτοιων εμποδίων. Πανδημικές λοιμώξεις όπως η βουβωνική πανώλη (πανούκλα), η γρίπη και η ευλογιά έχουν αφανίσει ανθρώπινους πληθυσμούς στο παρελθόν και οι λοιμώδεις ασθένειες εξακολουθούν να αποτελούν κίνδυνο για την υγεία παρά τις τεράστιες προσπάθειες που καταβάλλουμε για να τις ελέγξουμε.

## Οι μακροοργανισμοί-ξενιστές συνεξελίσσονται με τα μικροβιώματά τους για να σχηματίσουν νέους ολοβιώτες

Τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν παραπάνω δείχνουν ότι οι οργανισμοί εξαρτώνται από άλλους για την επιβίωση και την προσαρμογή τους. Σε αυτούς περιλαμβάνονται ομάδες ευκαρυωτών-προκαρυωτών σε δομές τόσο απλές όσο οι βιομεμβράνες αλλά και τόσο πολύπλοκες δομές όσο ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα. Με έκπληξη μαθαίνουμε ότι ακόμη και οι υγιέστεροι άνθρωποι είναι γεμάτοι με μια τεράστια ποικιλία βακτηρίων. Το 90% περίπου των κυττάρων σε έναν άνθρωπο είναι προκαρυώτες. Ο όρος που περιγράφει τον μικροβιακό πληθυσμό εντός του οργανισμού μας είναι **μικροβίωμα**. Τα μικροβιώματα δεν είναι στατικά: η μικροβιακή σύνθεση ενός ατόμου αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και ως απόκριση στο περιβάλλον (π.χ. αλλαγές στη διατροφή, φάρμακα ή ατμοσφαιρικές συνθήκες). Αυτή η σχέση θεωρείται συμβιωτική και όχι λοίμωξη, επειδή βασιζόμαστε σε αυτά τα βακτήρια για να παραμείνουμε υγιείς. Το ανθρώπινο μικροβίωμα έχει συνεξελιχθεί με τον άνθρωπο σχηματίζοντας μια ευκαρυωτική-προκαρυωτική ομάδα που ονομάζεται ολοβιώτης. Σε αυτή την ορολογία, ο μη μικροβιακός ξενιστής συχνά αποκαλείται **μακροοργανισμός**, που σημαίνει ότι μπορεί να παρατηρηθεί με γυμνό οφθαλμό. Όλοι οι μακροοργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων, των ζώων, των φυτών και των μυκήτων, είναι ολοβιώτες. Η συνεργασία ευκαρυωτών-προκαρυωτών θεωρείται πλέον προϋπόθεση για σχεδόν κάθε πολυκύτταρη μορφή ζωής στη Γη, ακόμη και σε επίπεδο μεμονωμένων οργανισμών.

Η αναγνώριση των ολοβιωτών άλλαξε τον τρόπο με τον οποίο οι επιστήμονες βλέπουν την εξέλιξη. Ο άνθρωπος και το μικροβίωμά του μπορεί τώρα να θεωρηθεί ως «υπεροργανισμός» που έχει την ικανότητα να εξελιχθεί ως μια ενιαία συλλογή γονιδίων, που συνολικά ονομάζονται **ολογονιδίωμα**. Το μικροβίωμα, το οποίο αποτελείται από τουλάχιστον 20.000 διαφορετικά είδη, συμβάλλει στη γενετική ποικιλομορφία αυτού του υπεροργανισμού: ενώ τα ανθρώπινα κύτταρα έχουν περίπου 22.000 διαφορετικά γονίδια (και αυτά είναι κατά 99,9% παρόμοια μεταξύ ατόμων), οι τρέχουσες εκτιμήσεις υποδεικνύουν ότι το μικροβίωμα περιέχει περίπου 10 εκατομμύρια γονίδια. Αυτή είναι η λογική προέκταση του θέματος που παρουσιάστηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου: οι ιοί μόλυναν προκαρυώτες για να σχηματίσουν ομάδες, οι προκαρυώτες σχημάτισαν συστάδες για να εξειδικευτούν, οι εξειδικευμένοι προκαρυώτες συνεργάστηκαν σχηματίζοντας ευκαρυώτες, οι ευκαρυώτες δημιούργησαν ομάδες με τους προκαρυώτες για τον σχηματισμό μακροοργανισμών

και οι μακροοργανισμοί εξελίχθηκαν ως μία μοναδική γενετική μονάδα δημιουργώντας ακόμη πιο πολύπλοκες μορφές ζωής. Αυτή η ιστορία αντανακλάται στο DNA μας – οι άνθρωποι περιέχουν γενετικό υλικό που έχει προέλευση από τα Αρχαία, τα βακτήρια, ακόμη και από ιικούς προγόνους. Αποδεικτικά στοιχεία πολύπλοκης επικοινωνίας μεταξύ των ειδών υποδεικνύουν ότι ένα πλήθος βιολογικών κωδίκων καθοδηγεί τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των γονιδίων.

Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ανθρώπινη υγεία και ασθένεια μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές στο μικροβίωμά μας. Ήδη πληθαίνουν οι αποδείξεις που υποστηρίζουν αυτήν την άποψη: μια σειρά ασθενειών, συμπεριλαμβανομένων των φλεγμονωδών και αυτοάνοσων διαταραχών, μπορεί να συνδέονται με την απώλεια ορισμένων στοιχείων του μικροβιώματός μας. Βλέπουμε επίσης αποδείξεις κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης και του τοκετού: τα βακτήρια που αποικίζουν τον κόλπο μιας γυναίκας κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης (λακτοβάκιλλοι) δημιουργούν ένα πολύ όξινο περιβάλλον για να αποτρέψουν δυνητικά παθογόνα. Κατά τη διάρκεια του τοκετού, το νεογέννητο εκτίθεται σε μικρόβια που συμβάλλουν στη δημιουργία των πρώτων «αποικιών» μικροβίων στο βρέφος (τα παιδιά που γεννιούνται με καισαρική τομή αποφεύγουν το πέρασμα μέσω του κόλπου και συχνά στερούνται αυτών των πρώιμων αποικιστών). Οι επιστήμονες έχουν επίσης δείξει ότι η θηλάζουσα μητέρα μπορεί να παρέχει θρεπτικά στοιχεία με το γάλα της που υποστηρίζουν την ανάπτυξη συγκεκριμένων βακτηρίων στο έντερο του βρέφους τα οποία αποτρέπουν την αποίκιση από επιβλαβή παθογόνα.

Οι γιατροί αξιοποιούν αυτήν την ιδέα «μεταμοσχεύοντας» τα μικρόβια ενός ατόμου σε ένα άλλο για τη θεραπεία ασθενειών (βλ. Ένθετο 1-15). Στην πραγματικότητα, το μικροβίωμα μας είναι πλέον

## ΕΝΘΕΤΟ 1-15 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΥΤΤΑΡΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑ: **Θεραπεύοντας τον ανθρώπινο ολοβιώτη με μεταμόσχευση προκαρυωτών**

Το *Clostridium difficile* είναι ένα βακτηριακό είδος που είναι κοινό στην πεπτική οδό των ανθρώπων και γενικά θεωρείται αβλαβές. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό το βακτήριο προκαλεί μια νόσο που ονομάζεται λοίμωξη από *Clostridium difficile* (CDI ), η οποία περιλαμβάνει συμπτώματα όπως συχνή υδαρή διάρροια, έντονο πόνο ή ευαισθησία στο στομάχι, ναυτία, απώλεια όρεξης, χαμηλό πυρετό, αίμα ή πύον στα κόπρανα, ακόμη και θάνατο. Η πιο συνηθισμένη θεραπεία για την CDI είναι τα αντιβιοτικά που χορηγούνται από το στόμα, τα οποία στοχεύουν το μικροβίωμα του εντέρου. Όταν τα αντιβιοτικά αποδεικνύονται αναποτελεσματικά, οι γιατροί μπορεί να χρησιμοποιήσουν μια πιο περίπλοκη θεραπεία που ονομάζεται μεταμόσχευση μικροβιώματος κοπράνων (Fecal Microbiota Transplant, FMT). Η FMT πραγματοποιείται με τη μεταφορά ενός δείγματος κοπράνων από έναν υγιή δότη στον ασθενή με CDI κατά τη διάρκεια κολονοσκόπησης ή ακόμη και μέσω μίας κάψουλας που λαμβάνεται από το στόμα και είναι πάνω από 95% αποτελεσματική στη θεραπεία της CDI.

Χρησιμοποιήστε το διαδίκτυο για να μάθετε περισσότερα για την FMT, την CDI, την αντιβιοτική θεραπεία και το μικροβίωμα των κοπράνων και στη συνέχεια εφαρμόστε τις γνώσεις σας για να απαντήσετε στις ακόλουθες ερωτήσεις:

1. Εφόσον το *Clostridium difficile* είναι κοινό στην ανθρώπινη πεπτική οδό, γιατί μόνο ένας μικρός αριθμός ανθρώπων εμφανίζει CDI; Ποιες είναι οι πιο κοινές αιτίες της CDI;
2. Γιατί ο πολλαπλασιασμός του *Clostridium difficile* προκαλεί τα προαναφερθέντα συμπτώματα; Πώς αυτό σχετίζεται με την έννοια της συνεργασίας και του ανταγωνισμού στους μικροβιακούς πληθυσμούς;
3. Εξηγήστε γιατί κάποιοι πληθυσμοί του *Clostridium difficile* είναι ανθεκτικοί στην αντιβιοτική θεραπεία.
4. Εξηγήστε γιατί η FMT είναι τόσο αποτελεσματική για τη θεραπεία της CDI.

ανάλογο με ένα σύνολο οργάνων του σώματός μας. Αυτό σημαίνει ότι οι νέες θεραπείες μπορούν να στοχεύουν αυτούς τους οργανισμούς, αντί των ανθρώπινων κυττάρων «ξενιστών», για τη θεραπεία ασθενειών.

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΝΟΙΑΣ 3

Ένα σημαντικό θέμα συζήτησης στην Ενότητα 1.4 είναι ότι η συνεργασία προάγει την επιτυχία σε όλα τα επίπεδα ζωής, από τους προκαρυώτες έως τους ολοβιώτες. Αν αυτό ισχύει, ευνοεί η εξέλιξη μια κατάσταση όπου όλοι οι οργανισμοί στη Γη συνεργάζονται για να σχηματίσουν έναν ενιαίο οργανισμό που εκτείνεται σε ολόκληρο τον πλανήτη; Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ο Βρετανός χημικός James E.Lovelock και η Αμερικανίδα βιολόγος Lynn Margulis ανέπτυξαν μια τέτοια ιδέα, η οποία είναι γνωστή ως υπόθεση Γαία. Παρότι εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο έντονης αντιπαράθεσης, ορισμένες πτυχές αυτής της υπόθεσης υποστηρίζονται από πειραματικά δεδομένα. Εφαρμόστε τις έννοιες που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, καθώς και οποιεσδήποτε άλλες αξιόπιστες πηγές, για να (α) δημιουργήσετε μια θεωρία που να υποστηρίζει ότι όλη η ζωή συνδέεται μέσω ενός συνεχώς αυξανόμενου επιπέδου πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων, και (β) να αντικρούσετε αυτή την υπόθεση, με το επιχείρημα ότι μια τέτοια πολυπλοκότητα δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της δαρβινικής εξέλιξης

## 1.5 Περίληψη κεφαλαίου

Τα κύτταρα, οι θεμελιώδεις μονάδες της ζωής, είναι πολύπλοκες και εξαιρετικά οργανωμένες δομές που διαθέτουν δύο χαρακτηριστικά, κοινά σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς: την ικανότητα αυτο-αντιγραφής και την ικανότητα αυτοεπιδιόρθωσης. Τα υπόλοιπα κεφάλαια αυτού του βιβλίου επικεντρώνονται στους κυτταρικούς μηχανισμούς που είναι υπεύθυνοι για αυτές τις δύο ικανότητες, αλλά προτού εξετάσουμε λεπτομερώς τη δομή και τη λειτουργία των κυττάρων, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι τα κύτταρα έχουν κοινά γνωρίσματα. Όλα τα κύτταρα περιέχουν νερό και αποτελούνται κυρίως από μόρια με βάση τον άνθρακα, τα οποία μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις δομικές κατηγορίες: λιπίδια, σάκχαρα, αμινοξέα και νουκλεϊκά οξέα. Αυτά τα απλά δομικά στοιχεία σχηματίζουν έναν τεράστιο αριθμό διαφορετικών μορίων, καθένα από τα οποία εκτελεί έναν πολύ μικρό αριθμό εργασιών που είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της ζωής. Κατά την πορεία της εξέλιξης, τα κύτταρα απέκτησαν μια κοινή στρατηγική για την απλοποίηση αυτών των εργασιών: συγκέντρωσαν αυτά τα μόρια σε ομάδες που συνεργάζονται για την εκτέλεση ενός υποσυνόλου κυτταρικών λειτουργιών. Η επακόλουθη δομική πολυπλοκότητα αυτών των ομάδων οδηγεί στην ποικιλομορφία που απαιτείται για να λάβει χώρα η εξέλιξη. Σε πολλές περιπτώσεις, η σχέση δομής-λειτουργίας εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται αυτές οι ομάδες. Για παράδειγμα, οι προκαρυώτες ανέπτυξαν μηχανισμούς για τη μεταξύ τους προσκόλληση και την πρόσφυση σε σταθερές επιφάνειες δημιουργώντας σταθερά συμπλέγματα που γενικά είναι πιο επιτυχημένα σε σχέση με τους μεμονωμένους προκαρυωτικούς οργανισμούς. Τα κύτταρα των Αρχαίων απέκτησαν την ικανότητα να περικλείουν ομάδες μορίων, συμπεριλαμβανομένου τουλάχιστον ενός ολόκληρου ζωντανού βακτηριακού οργανισμού, σε διαμερίσματα που περιβάλλονται απόμεμβράνη και ονομάζονται οργανίδια. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία των ευκαρυωτικών οργανισμών. Ομάδες ευκαρυωτών και προκαρυωτών σχηματίζουν οργανισμούς που ονομάζονται ολοβιώτες, οι οποίοι συν-εξελίσσονται ως ένας μοναδικός «υπεροργανισμός». Αυτές οι ιδέες αποτελούν τη βάση για την κατανόηση του πώς και γιατί τα κύτταρα μοιάζουν και ενεργούν με αυτόν τον τρόπο.

## Ερωτήσεις μελέτης κεφαλαίου

1. Χρησιμοποιώντας ως οδηγό τη λίστα «απαραίτητων εργασιών» που εκτελούν τα κύτταρα, ποιες επιπλέον λειτουργίες πρέπει να εκτελούν τα κύτταρα; Ποιες επιπλέον λειτουργίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τους μονοκύτταρους οργανισμούς (συμπεριλαμβανομένων των προκαρυωτικών) ή για τα κύτταρα των ιστών (π.χ. δέρμα, καρδιακός μυς, εγκέφαλος);
2. Οι περισσότεροι προκαρυώτες γενικά θεωρούνται λιγότερο περίπλοκοι από τα περισσότερα ευκαρυωτικά κύτταρα, ωστόσο είναι τα πιο άφθονα κύτταρα στη Γη. Πώς θα μπορούσε κανείς να εξηγήσει γιατί οι απλοί προκαρυώτες είναι τόσο άφθονοι;
3. Εξηγήστε τη σχέση δομής-λειτουργίας. Στη συνέχεια αναπτύξτε ένα παράδειγμα αυτής της σχέσης στην καθημερινή (μη βιολογική) ζωή. Πόσο εφαρμόσιμη είναι αυτή η έννοια στις μη βιολογικές δομές με τις οποίες αλληλεπιδρούν οι άνθρωποι κατά τη διάρκεια μιας συνηθισμένης ημέρας;
4. Ποιες ιδιότητες του ατόμου του άνθρακα του επιτρέπουν να σχηματίζει μεγαλύτερη ποικιλία μορίων από οποιοδήποτε άλλο άτομο;
5. Ο άνθρακας είναι ένα από τα άτομα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία στα σάκχαρα και τα λιπίδια, αλλά τα σάκχαρα και τα λιπίδια έχουν πολύ διαφορετικές χημικές ιδιότητες. Πώς θα εξηγούσε κανείς αυτή τη διαφορά;
6. Οι αγελάδες και οι άνθρωποι είναι θηλαστικά, αλλά οι αγελάδες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα περισσότερα αγρωστώδη (τα οποία περιέχουν τον β1,4-συνδεδεμένο πολυσακχαρίτη κυτταρίνη) ως πηγή τροφής, σε αντίθεση με τον άνθρωπο. Ποιες ειδικές ικανότητες πρέπει να έχουν οι αγελάδες για να μπορούν να καταναλώνουν αγρωστώδη; (Υπόδειξη: οι αγελάδες και οι άνθρωποι έχουν διαφορετικά βακτήρια στη γαστρεντερική τους οδό).
7. Δώστε ένα παράδειγμα βιολογικού κώδικα που δεν αναφέρεται συγκεκριμένα σε αυτό το κεφάλαιο και εξηγήστε γιατί είναι χρήσιμος για τους οργανισμούς. Τι κάνει το παράδειγμά σας να θεωρείται *κώδικας*;
8. Σε πολλά σημεία του κεφαλαίου παρατίθενται γενετικές αποδείξεις. Για ποιο λόγο οι πληροφορίες σχετικά με τη γενετική αλληλουχία θεωρούνται πιο χρήσιμες από άλλους παράγοντες όπως το κυτταρικό μέγεθος, η δομή της μεμβράνης ή το μέγεθος ενός πληθυσμού όταν συζητάμε για την εξέλιξη;
9. Για ποιο λόγο είναι σημαντικό το γεγονός ότι τα μιτοχόνδρια ήταν τα πρώτα οργανίδια; Γιατί θεωρούνται ακόμη πιο σημαντικά και από τον πυρήνα για το κύτταρο;
10. Η εμφάνιση της αίσθησης απαρτίας (quorum sensing) θεωρείται ως ένα από τα πιο σημαντικά συμβάντα κατά την εξέλιξη της ζωής στη Γη. Συγκρίνετε τη συνύπαρξη των οργανισμών πριν και μετά αυτόν τον κώδικα και δώστε μια σύντομη εξήγηση του λόγου για τον οποίο εξακολουθεί να υπάρχει μέχρι σήμερα στους προκαρυωτικούς οργανισμούς.

## Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Το μεθάνιο έχει τον χημικό τύπο $CH_4$. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις για το μεθάνιο είναι λανθασμένη;
   α. Έχει χαμηλότερη μοριακή μάζα από το νερό.
   β. Σχηματίζει δεσμούς υδρογόνου με το νερό.
   γ. Τα τέσσερα άτομα υδρογόνου του διατάσσονται σε τετραεδρικό σχηματισμό γύρω από το άτομο του άνθρακα.
   δ. Είναι αέριο σε θερμοκρασία δωματίου και σε πίεση μίας ατμόσφαιρας.
   ε. Είναι υδρογονάνθρακας.

2. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις περιγράφει καλύτερα την έννοια της «ζωής»;
   α. Τα έμβια όντα πρέπει να διαθέτουν ικανότητα αντιγραφής και αυτοεπιδιόρθωσης.
   β. Τα έμβια όντα πρέπει να περιέχουν τουλάχιστον έναν πολυσακχαρίτη.
   γ. Τα έμβια όντα πρέπει να αναπαράγονται φυλετικά.
   δ. Τα έμβια όντα πρέπει να παραμένουν σε ισορροπία με το περιβάλλον τους.
   ε. Τα έμβια όντα πρέπει να παραμένουν σε ανάπαυση κατά την αναπαραγωγή.

3. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις για τους πολυσακχαρίτες είναι σωστή;
   α. Σχηματίζουν ένα μέρος του σκελετού των νουκλεϊκών οξέων.
   β. Σχηματίζουν πεπτιδικούς δεσμούς με πρωτεΐνες.
   γ. Σχηματίζουν τον σκελετό των φωσφολιπιδίων.
   δ. Συγκρατούνται με γλυκοζιτικούς δεσμούς.
   ε. Επενδύουν την εσωτερική μεμβράνη του πυρήνα ενός ευκαρυωτικού κυττάρου.

4 Ποιο από τα παρακάτω αποτελεί παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο τα κύτταρα αποθηκεύουν γενετικές πληροφορίες;
   α. Τα κύτταρα συνθέτουν πολύπλοκους πολυσακχαρίτες πλούσιους σε πληροφορίες από απλούς μονοσακχαρίτες.
   β. Τα κύτταρα καταλύουν πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις που μετατρέπουν το DNA σε μονοσακχαρίτες και βάσεις.
   γ. Τα κύτταρα κωδικοποιούν πληροφορία μέσω σχηματισμού δεσμών σακχάρου-φωσφορικού στους πολυσακχαρίτες.
   δ. Τα κύτταρα μεταφέρουν υλικά μέσα και έξω από το εσωτερικό τους με βάση τις πληροφορίες του εξωκυττάριου περιβάλλοντος.
   ε. Τα κύτταρα συναρμολογούν μακριές αλυσίδες νουκλεοτιδίων.

5. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις για το νερό είναι λανθασμένη;
   α. Το νερό είναι ένα ουδέτερο μόριο που περιέχει δέκα πρωτόνια και δέκα ηλεκτρόνια.
   β. Τα άτομα Η και το άτομο Ο στο νερό μοιράζονται ηλεκτρόνια σε ομοιοπολικούς δεσμούς.
   γ. Τα άτομα υδρογόνου στο νερό είναι πιο ηλεκτραρνητικά από τα άτομα οξυγόνου.
   δ. Το νερό έχει υψηλότερη τιμή ειδικής θερμότητας από το μεθάνιο.
   ε. Το νερό είναι ένα πολικό μόριο με μερικό θετικό φορτίο στο ένα άκρο και μερικό αρνητικό φορτίο στο άλλο άκρο.

6. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις σχετικά με τα βιοφίλμ (βιοϋμένια, βιομεμβράνες) είναι σωστή;
   α. Αποτελούνται μόνο από ευκαρυωτικά κύτταρα ενσωματωμένα σε εξωκυττάριες πολυμερείς ουσίες.
   β. Αποτελούνται μόνο από προκαρυωτικά κύτταρα ενσωματωμένα σε εξωκυττάριες πολυμερείς ουσίες.
   γ. Αποτελούνται από ευκαρυωτικά και προκαρυωτικά κύτταρα ενσωματωμένα σε εξωκυττάριες πολυμερείς ουσίες.
   δ. Αποτελούνται μόνο από ζωντανά προκαρυωτικά κύτταρα εγκολπωμένα σε άλλα προκαρυωτικά κύτταρα.
   ε. Αποτελούνται μόνο από προκαρυωτικά κύτταρα που βρίσκονται σε συμβιωτική σχέση και στενή γειτνίαση με άλλα προκαρυωτικά κύτταρα.

7. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις περιγράφει καλύτερα την έννοια του «ολοβιώτη»;
   α. Είναι η συσσωμάτωση ενός μακροσκοπικού ξενιστή (macrobiota) και πληθώρας αλληλεπιδρώντων μικροοργανισμών (microbiota).

β. Είναι το συνονθύλευμα προκαρυωτικών ξενιστών και όλων των μικροβιακών συμβιωτών τους.
γ. Είναι η συγκέντρωση ειδών σε μια ενιαία οικολογική μονάδα.
δ. Είναι η συλλογή μικροβιακής χλωρίδας (microbiota) και ενός αρχαιοβακτηρίου -ξενιστή που ανταγωνίζονται μεταξύ τους.
ε. Είναι η αναπαράσταση της ανισορροπίας μεταξύ μικροβιακής χλωρίδας και ξενιστή.

8. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις για το πυρίτιο είναι λανθασμένη;
α. Το πυρίτιο είναι το δεύτερο σε αφθονία άτομο στη Γη.
β. Δεσμοί πυριτίου-άνθρακα σχηματίζονται συχνά στους οργανισμούς.
γ. Τα άτομα πυριτίου μπορούν να σχηματίσουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με άλλα στοιχεία για να σχηματίσουν χημικές ενώσεις.
δ. Το πυρίτιο μπορεί να ενσωματωθεί σε μόρια με βάση τον άνθρακα.
ε. Το πυρίτιο δεν δημιουργεί και δεν διασπά εύκολα δεσμούς με το οξυγόνο.

9. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις για τους δεσμούς μεταξύ μονομερών είναι λανθασμένη;
α. Τα αμινοξέα, στα πολυπεπτίδια, συνδέονται με πεπτιδικούς δεσμούς.
β. Οι γλυκοζιτικοί δεσμοί συνδέουν μονοσακχαρίτες στα νουκλεοτίδια.
γ. Τα άτομα με έλλειψη λακτάσης δεν μπορούν να διασπάσουν τον γλυκοζιτικό δεσμό στον δισακχαρίτη λακτόζη.
δ. Τα νουκλεοτίδια συνδέονται με φωσφοδιεστερικούς δεσμούς τόσο στο DNA όσο και στο RNA.
ε. Ο γλυκοζιτικός δεσμός που συνδέει τη γλυκόζη και τη γαλακτόζη μπορεί να διασπαστεί από τη λακτάση.

10. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις περιγράφει καλύτερα την έννοια της βιολογίας του κώδικα;
α. Είναι μια κωδικοποιημένη κυτταρική γλώσσα που απαιτεί αίσθηση απαρτίας (quorum sensing) για την αποκωδικοποίησή της.
β. Είναι ένα σύνολο κανόνων που μεταβιβάζονται από γενιά σε γενιά στους ζωντανούς οργανισμούς.
γ. Είναι ταυτόσημη με τον γενετικό κώδικα, ο οποίος επιτρέπει στα σήματα RNA να συνθέσουν πρωτεΐνες.
δ. Είναι ένα σύνολο κανόνων για τη συναρμολόγηση των βιοϋμενίων (biofilms).
ε. Είναι ένα σύνολο κανόνων που απαντάται μόνο στους ολοβιώτες.

## Βιβλιογραφία

Barbieri M. What is code biology? *Biosystems* 164:1–10. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2017.10.005

Esmaili S, Bass AD, Cloutier P, Sanche L, Huels MA. Synthesis of complex organic molecules in simulated methane rich astrophysical ices. *J Chem Phys*. 2017 Dec 14;147(22): 224704. doi: 10.1063/1.5003898

Fiore M, Strazewski P. Prebiotic Lipidic Amphiphiles and Condensing Agents on the Early Earth. *Life*. 2016 Jun; 6(2): 17. doi: 10.3390/life6020017

Kan, S.B.J. et al. Directed evolution of cytochrome c for carbon–silicon bond formation: Bringing silicon to life. *Science*, 2016:354 (6315), 1048–1051. doi: 10.1126/science.aah6219