

# 1 Ένας εξελισσόμενος κόσμος

Τι είναι η εξέλιξη; Θα μπορούσε κανείς να την ορίσει με πολλούς και ποικίλους τρόπους. Ο όρος «εξέλιξη» θα μπορούσε να αναφέρεται είτε στο γεγονός ότι οργανισμοί έχουν αλλάξει στην πορεία των αιώνων, είτε στη διεργασία διά της οποίας αυτό έχει συμβεί, είτε πάλι στο αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας, το οποίο περιλαμβάνει και τις εξαισιες προσαρμογές των οργανισμών και τα –κατά τρόπο θαυμαστό– κοινά γνωρίσματά τους. Προκειμένου να ορίσω την εξέλιξη, πολλές φορές στο ανά χειράς βιβλίο βασίζομαι στην *Καταγωγή των ειδών* (1859)<sup>1</sup> του Κάρολου Δαρβίνου, το θεμελιακό κείμενο της σημερινής εξελικτικής θεωρίας.<sup>2</sup> Ο Δαρβίνος πρότεινε μια «θεωρία καταγωγής με τροποποίηση μέσω της φυσικής επιλογής»<sup>3</sup> (Darwin, 1859, σ. 343) ως εξήγηση για την «καταγωγή των ειδών

- 1 Ο πλήρης τίτλος του βιβλίου ήταν: *On the Origins of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. Από εδώ και στο εξής θα αναφέρομαι σε αυτό το βιβλίο του Δαρβίνου απλώς ως *Καταγωγή*.
- 2 Πρέπει να επιστημανθεί εξ αρχής ότι η λέξη *θεωρία* έχει ολωσδιόλου διαφορετικό νόημα στην επιστήμη απ' ό,τι στην κοινή της χρήση. Έτσι, στην επιστήμη, μια θεωρία δεν είναι απλώς μια υπόθεση, μια σκέψη ή μια εικασία (ό,τι δηλαδή υπονοείται στην καθημερινή χρήση της λέξης), αλλά μάλλον ένα πεδίο έρευνας με ευρέως αποδεκτές αρχές, μεθόδους και βάσεις, ή ένα σώμα εξηγητικών υποθέσεων οι οποίες υποστηρίζονται από στέρεα εμπειρικά δεδομένα (Rosenberg, 2005, σ. 69).
- 3 Ένα μείζον πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι μη ειδικοί, σε σχέση με τη φυσική επιλογή, είναι να κατανοήσουν με σαφήνεια τι πράγμα επιλέγεται: γονίδια, άτομα ή ομάδες; Υπάρχουν διαφορετικές απόψεις επ' αυτού και οι ειδικοί το χαρακτηρίζουν ως *διαμάχη σχετικά με τα επίπεδα επιλογής* (Okasha, 2006). Ωστόσο, πρέπει να ξεκαθαριστεί πως, όταν οι ειδικοί μιλούν για τη φυσική επιλογή, αναφέρονται σε μιαν ασυνείδητη διαδικασία επιλογής που λαμβάνει χώρα στη φύση, και όχι στη συνειδητή επιλογή, από τη φύση, οποιουδήποτε πράγματος. Το γιατί οι μη ειδικοί τείνουν προς τη δεύτερη ερμηνεία, παρά προς την πρώτη, θα συζητηθεί στα Κεφάλαια 2 και 3. Μια εναλλακτική μεταφορά για να περιγραφεί αυτή η διαδικασία είναι η περιβαλλοντική διήθηση (Rosenberg & McShea, 2008, σ. 18). Στο ανά χειράς βιβλίο, εντούτοις, θα εμμείνω

– αυτό το υπέρτατο μυστήριο» (σ. 1). Συγκεκριμένα, ο στόχος του ήταν να εξηγήσει την προέλευση των προσαρμογών των οργανισμών: «πώς τα αναρίθμητα είδη που κατοικούν σ' αυτόν τον κόσμο έχουν τροποποιηθεί ώστε να αποκτήσουν την τελειότητα στη δομή και τη συμπροσαρμογή, οι οποίες δικαίως προκαλούν τον θαυμασμό μας» (σ. 3). Η φράση («αταγωγή με τροποποίηση» περικλείει τις δύο κεντρικές ιδέες της εξέλιξης: όλοι οι οργανισμοί σχετίζονται μεταξύ τους επειδή κατάγονται από έναν κοινό πρόγονο μέσω μιας διεργασίας τροποποίησης που έχει δημιουργήσει νέες μορφές ζωής από προϋπάρχουσες. Έτσι, η εξέλιξη μπορεί εν συντομία να οριστεί ως η φυσική διεργασία διά της οποίας νέα είδη<sup>4</sup> προκύπτουν ως τροποποιημένοι απόγονοι προϋπαρχόντων ειδών. Η εξελικτική θεωρία είναι η επιστημονική θεωρία που εξηγεί πώς αυτή η διεργασία έχει λάβει και ακόμα λαμβάνει χώρα στη Γη, με αναφορά σε συγκεκριμένες παλαιές και τωρινές όψεις της ζωής στη Γη και σε συγκεκριμένα επεισόδια της ιστορίας της. Το πιο σημαντικό είναι ότι η εξελικτική θεωρία εξηγεί τόσο την ενότητα όσο και την ποικιλότητα της ζωής. Η ζωή έχει εξελιχθεί, από έναν ή λίγους παγκόσμιους κοινούς προγόνους, σε πολλές διαφορετικές μορφές ζωής ποικίλων σχημάτων, μεγεθών, χρωμάτων, συμπεριφορών και συνηθειών. Παρ' όλα αυτά, έχουν όλα από κοινού κάποιους κύριους χαρακτήρες<sup>5</sup> κληρονομημένους από τον κοινό πρόγονο ή τους κοινούς προγόνους. Η εξελικτική θεωρία προσφέρει τις καλύτερες εξηγήσεις (μέχρι σήμερα) για όλα τούτα τα φαινόμενα.

Σ' αυτό το κεφάλαιο δίνω μια γενική επισκόπηση του πώς οι εξελικτικοί βιολόγοι εργάζονται με στόχο να κατανοήσουν την κοινή καταγωγή καθώς και την απόκλιση των διαφόρων μορφών ζωής. Επικεντρώ-

---

στη μεταφορά του Δαρβίνου, έχοντας αποσαφηνίσει ότι η φυσική επιλογή αναφέρεται σε μιαν ασυνείδητη διαδικασία επιλογής που λαμβάνει χώρα στη φύση (η οποία θα συζητηθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 6).

4 Είναι δύσκολο να δοθεί ένας και μόνον ορισμός για τούτη την έννοια (βλ. Wilkins, 2009· Ereshefsky, 2010b· Richards, 2010). Περιγράφω με κάποια λεπτομέρεια αυτές τις δυσκολίες στο Κεφάλαιο 6. Αυτή η έννοια χρησιμοποιείται σ' όλο το βιβλίο σχετικά χαλαρά, εννοώντας μια ομάδα ατόμων τα οποία είναι αναπαραγωγικά απομονωμένα από άλλες ομάδες και/ή γενετικά διακριτά. Για τους φυλετικά αναπαραγόμενους οργανισμούς, ένα είδος ορίζεται ως μια ομάδα από συνήθως παρόμοιους οργανισμούς που μπορούν να διασταυρωθούν και να δώσουν γόνιμους απογόνους.

5 Για να αποφύγω τις ανακολουθίες αναφερόμενος, με την ίδια σημασία, σε γνωρίσματα, χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, κ.λπ., θα χρησιμοποιώ σ' ολόκληρο το βιβλίο τον όρο «χαρακτήρας», ορίζοντάς τον ως οποιοδήποτε αναγνωρίσιμο γνώρισμα ενός οργανισμού, που μπορεί να υπάρξει σε μια ποικιλία καταστάσεων, σε πολλά επίπεδα, από το μοριακό ως του οργανισμού (Arthur, 2004, σ. 212).

νομαι στο πώς οι εξελικτικοί βιολόγοι ερευνούν τη φύση και αποκτούν δεδομένα ώστε να κατασκευάζουν τέτοιες εξηγήσεις και να αναπαριστούν παρελθόντα συμβάντα στην ιστορία της Γης, βασισμένοι σ' ό,τι αποκαλείται συχνά «ενδείξεις για την εξέλιξη», π.χ. απολιθώματα, βιογεωγραφία και δείγματα DNA. Πρόσφατα έχουν εκδοθεί πολλά βιβλία που παρουσιάζουν ενδείξεις για την εξέλιξη (π.χ. Coyne, 2009· Dawkins, 2009· Rogers, 2011). Επομένως, σε τούτο το κεφάλαιο δίνω μόνο μερικά επεξηγηματικά παραδείγματα και κατόπιν στρέφομαι σε συγκεκριμένα ερωτήματα πάνω σε ζητήματα σχετικά με την οικοσιτοποίηση και τα επιδημικά λοιμώδη νοσήματα, τα οποία χρησιμεύουν ως παραδείγματα. Ισχυρίζομαι ότι η εξελικτική θεωρία προσφέρει λογικές και έγκυρες απαντήσεις σ' αυτά τα ερωτήματα, προσφέροντας επαρκείς εξηγήσεις για ό,τι παρατηρείται.

Προτού να στραφώ στο πώς οι επιστήμονες μελετούν την εξέλιξη, επιτρέψτε μου να αποσαφηνίσω μια προσέγγιση που στο ανά χείρας βιβλίο έχει κεντρική θέση. Η μελέτη των γονιδίων και των σχετιζόμενων με τα γονίδια φαινομένων (αλλαγές στη γονιδιακή συχνότητα· αλλαγές στις γονιδιακές αλληλουχίες, κ.λπ.) παίζει κύριο ρόλο στη μελέτη της εξέλιξης. Ωστόσο, είναι δύσκολο να δοθεί ένας μοναδικός ορισμός για την έννοια του *γονιδίου* (βλ. Burian & Kampourakis, 2013, για μια επισκόπηση). Πιο προβληματική είναι η ιδέα των *«γονιδίων για»*, ήτοι των γονιδίων που *ελέγχουν/κωδικοποιούν* φαινοτύπους. Τα γονίδια δεν ελέγχουν τίποτε από μόνα τους, αλλά δρουν μέσα σε κυτταρικά περιβάλλοντα τα οποία επηρεάζουν την έκφρασή τους. Εάν εσείς κι εγώ έχουμε το ίδιο βιβλίο μαγειρικής (DNA) και μαγειρέψουμε ένα φαγητό, το αποτέλεσμα (ο φαινότυπος) θα μπορούσε να είναι πολύ διαφορετικό κι ας ακολουθήσαμε και οι δύο την ίδια συνταγή (γονίδια). Η έκφραση της πληροφορίας στο βιβλίο μαγειρικής (DNA ή γονίδια) εξαρτάται από τον μάγειρα (το αναπτυξιακό σύστημα) που θα τη μαγειρέψει. Ως εκ τούτου, είναι χρήσιμο η *ανάπτυξη* να αναφέρεται μαζί με την *κληρονομικότητα*, ιδίως όσον αφορά τους πολυκύτταρους οργανισμούς, καθώς οι αναπτυξιακές διεργασίες μπορεί να δώσουν αποτελέσματα διαφορετικά από κείνα που θα περίμενε κάποιος διαβάζοντας απλώς τις αλληλουχίες DNA. Για να το κατορθώσω αυτό, σ' όλο το βιβλίο αναφέρομαι σε αλληλουχίες DNA που εμπλέκονται σε φαινόμενα, αντί να χρησιμοποιώ την υπερβολικά ντετερμινιστική γενετικά γλώσσα των *γονιδίων για* (βλ. Moore, 2002, 2013· Keller, 2010· Burian & Kampourakis, 2013). Κατά κάποιον τρόπο, το ανά χείρας βιβλίο χρησιμεύει ως πείραμα για να εξακριβωθεί αν ένα επιστημονικό κείμενο μπορεί να είναι ακριβές δίχως κάποια αναφορά σε γονιδιακές έννοιες ή σε *«γονίδια για»*.

## Πώς γνωρίζουμε ό,τι γνωρίζουμε σχετικά με την εξέλιξη

Η εξέλιξη συμβαίνει στη Γη εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια. Κατά συνέπεια, αν και λαμβάνει χώρα ακόμα και τώρα, πολλές από τις πληροφορίες γι' αυτήν προέρχονται από το παρελθόν. Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφω τη σημασία της ιστορίας για τις εξελικτικές εξηγήσεις. Φανταστείτε ότι ανοίγετε την τηλεόρασή σας κι αρχίζετε να παρακολουθείτε ένα επεισόδιο μιας σειράς που δεν έχετε παρακολουθήσει ποτέ ξανά, αν και η πρεμιέρα της έγινε πριν από 20 χρόνια. Συνειδητοποιείτε ότι δεν γνωρίζετε τίποτε σχετικά με τους χαρακτήρες ή τις σχέσεις τους, η πλοκή παραείναι περίπλοκη και με δυσκολία καταλαβαίνετε τι συμβαίνει. Ωστόσο, τη βρίσκετε ενδιαφέρουσα κι αποφασίζετε πως αξίζει τον κόπο να προσπαθήσετε να μάθετε κι άλλα πράγματα για τα προηγούμενα επεισόδια. Αυτό που ίσως θα κάνατε, είναι να προσπαθούσατε να τα βρείτε σε DVD ή να βρείτε κάποιες πληροφορίες γι' αυτά στον επίσημο ιστότοπο της εταιρείας παραγωγής. Μπορεί επίσης να αναζητούσατε κάποιον που παρακολουθεί επί μακρόν τη σειρά και που θα μπορούσε να σας αφηγηθεί τα περασμένα επεισόδια. Τελικά, ίσως να καταλήγατε με κάμποσες πληροφορίες που θα σας βοηθούσαν να ακολουθήσετε την πλοκή και να συνεχίσετε να παρακολουθείτε τη σειρά, που 'χει πλέον γίνει η αγαπημένη σας.

Ατυχώς, η μελέτη της εξέλιξης και η απόκτηση στοιχείων από το παρελθόν είναι πολύ πιο δύσκολες. Οι επιστήμονες έχουν πρόσβαση μόνο σ' ό,τι μπορούν τώρα να παρατηρήσουν· δεν υπάρχουν πουθενά καταγεγραμμένα πλήρως όσα συνέβησαν στο παρελθόν και, φυσικά, κανένας δεν ήταν εκεί ως μάρτυράς τους. Φανταστείτε ότι στην προσπάθειά σας να ανακαλύψετε την πλοκή περασμένων επεισοδίων της αγαπημένης σας τηλεοπτικής σειράς δεν κατορθώσατε να βρείτε ένα πλήρες σετ DVD, έναν ιστότοπο όπου να είναι διαθέσιμο το σενάριο ώστε να το κατεβάσετε, ή έναν φίλο που να την είχε παρακολουθήσει από την αρχή ή τουλάχιστον για κάποιο διάστημα στο παρελθόν. Φανταστείτε ότι καταφέρατε μονάχα να βρείτε κάποια παλιά επεισόδια από διαφορετικές σεζόν, δύο σχισμένες σελίδες με μια κριτική για κάποια από τα πρώτα επεισόδια, μερικά βιντεοκλίπ σκόρπιων επεισοδίων ανεβασμένα στο YouTube δίχως να αναφέρεται η αντίστοιχη σεζόν, και μια παλιά συνέντευξη με ένα από τα μέλη του καστ. Αυτό που θα έπρεπε να κάνετε θα ήταν να παρακολουθήσετε ή να διαβάσετε ό,τι μπορέσατε να βρείτε και να αναζητήσετε στοιχεία για συμβάντα που συνέβησαν σε περασμένα επεισόδια. Αλλά θα μπορούσατε επίσης να συνεχίσετε να παρακολουθείτε τα τωρινά επεισόδια και να καταγράφετε ό,τι αναφορές γίνονταν σε περασμένα γεγονότα, που θα σας βοηθούσαν να ανακατασκευάσετε την ιστορία ως το σημείο που αρχίσατε

να παρακολουθείτε τη σειρά. Αυτό είναι εν μέρει ό,τι κάνουν οι εξελικτικοί βιολόγοι. Δεν έχουν μιαν άμεση εικόνα του παρελθόντος, όμως μπορούν να βγάλουν συμπεράσματα για περασμένα γεγονότα μέσα απ' ό,τι παρατηρούν σήμερα. Υπάρχουν τρεις διακριτές, συμπληρωματικές κατηγορίες στοιχείων. Η πρώτη είναι παρόμοια με κείνη που θα επιχειρούσατε ίσως να βρείτε προσπαθώντας να μάθετε περισσότερα για την αγαπημένη σας σειρά. Οι άλλες δύο χαρακτηρίζουν περισσότερο την επιστήμη.<sup>6</sup>

Αυτό που κάνουν οι εξελικτικοί βιολόγοι είναι να αναζητούν στοιχεία του παρελθόντος ανάλογα με τις σχισμένες σελίδες ή τα κλιπ στο YouTube. Ψάχνουν για κατάλοιπα της ιστορίας της ζωής στη Γη, και τούτα συνήθως υπάρχουν σε πετρώματα και σε μόρια DNA. Για παράδειγμα, η ανθρώπινη εξέλιξη στον καιρό μας έχει γίνει πολύ καλά κατανοητή χάρη σ' ευρήματα απολιθωμάτων και DNA. Αυτό, φυσικά, δεν σημαίνει ότι οι βιολόγοι έχουν επιλύσει τα πάντα ή ότι δεν παραμένουν αναπάντητα ερωτήματα. Για παράδειγμα, οι επιστήμονες δεν συμφωνούν ακόμα για το πώς ακριβώς θα έπρεπε να ταξινομηθούν οι άνθρωποι. Κάποιοι επιστήμονες χρησιμοποιούν τον όρο Ανθρωπίνοι (Hominini) εξίσου για τους χιμπατζήδες/μπονόμπο και για τους ανθρώπους, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν τον όρο Ανθρωπίνοι μόνο για τον ανθρώπινο κλάδο. Όμως αυτό δεν σημαίνει πως οποιοσδήποτε απ' αυτούς αμφισβητεί ότι τα γένη *Gorilla*, *Pan* και *Homo* έχουν στενή σχέση μεταξύ τους.<sup>7</sup> Απεναντίας! Μέχρι πρόσφατα, ο ανθρώπινος κλάδος διακρινόταν από τους μεγάλους πιθήκους (τους χιμπατζήδες, τους μπονόμπο, τους γορίλλες και τους ουρακοτάγκους) μέσα από τις οικογένειες Hominidae και Pongidae, αντίστοιχα. Εντούτοις, κάποιοι επιστήμονες συμπεριλαμβάνουν πλέον τόσο τους

---

6 Μια άλλη, ίσως πιο συνήθης αναλογία είναι ανάμεσα σ' έναν εξελικτικό βιολόγο κι έναν ντετέκτιβ (π.χ., βλ. Cleland, 2002). Ωστόσο, οι ντετέκτιβ συνήθως ερευνούν μεμονωμένα συμβάντα (εγκλήματα) δίχως να γυρεύουν γενικά μοτίβα (εκτός κι αν ο εγκληματίας είναι κατά συρροή δολοφόνος). Και πιο σημαντικό ακόμα είναι ότι μπορεί να μην ενδιαφέρονται να ανακαλύψουν περισσότερα όσον αφορά ακολουθίες συμβάντων τα οποία ίσως να σχετίζονται μεταξύ τους και ίσως όχι. Αντιθέτως, για να καταλάβει κάποιος τι συμβαίνει σε μια τηλεοπτική σειρά, θα πρέπει να μάθει όσο γίνεται περισσότερα για όλη την ιστορία και όχι μονάχα για μεμονωμένα γεγονότα ή για γεγονότα όπου εμπλέκονται μεμονωμένοι χαρακτήρες.

7 Σε πολλές περιπτώσεις, αυτοί που αντιτίθενται στην εξέλιξη, για οποιονδήποτε λόγο, παρουσιάζουν τέτοιες διαφωνίες ως ένδειξη του ότι η επιστήμη δεν μπορεί να παρέχει οριστικές απαντήσεις. Σε τούτη την περίπτωση, θα μπορούσαν ίσως να θεωρήσουν το γεγονός ότι κάποιοι επιστήμονες διακρίνουν τον ανθρώπινο κλάδο απ' αυτόν των πιθήκων, ενώ άλλοι όχι, ως μια διαμάχη που μαρτυρεί την ανεπάρκεια της επιστήμης, παραβλέποντας το ότι όλοι αυτοί οι επιστήμονες θεωρούν τους ανθρώπους και τους πιθήκους στενά συνδεδεμένους εξελικτικά.

ανθρώπους όσο και τους μεγάλους πιθήκους στην οικογένεια Hominidae (Harrison, 2010· Wood, 2010).

Παρά τις διαφορές που έχουν μεταξύ τους οι σκελετοί των ανθρώπων, των χιμπατζήδων και των γοριλλών, υπάρχουν επίσης κάποιες έκδηλες ομοιότητες παρατηρημένες ήδη από την εποχή του Δαρβίνου. Ο Δαρβίνος απέφυγε να πραγματευθεί την ανθρώπινη εξέλιξη στην *Καταγωγή*, αλλά ήξερε ότι η θεωρία του θα είχε αντίστοιχες επιπτώσεις:

Όλη η ιστορία του κόσμου, όπως είναι γνωστή σήμερα, αν και έχει διάρκεια ακατανόητη για εμάς, θα αναγνωρίζεται εφεξής ως ένα απλό χρονικό κλάσμα σε σύγκριση με τους αιώνες που έχουν περάσει απότου δημιουργήθηκε το πρώτο πλάσμα, ο πρόγονος αναρίθμητων εξαφανισμένων και ζώντων απογόνων. Στο μακρινό μέλλον, βλέπω ανοιχτά πεδία για πολύ πιο σημαντικές έρευνες. Η ψυχολογία θα βασιστεί σ' ένα νέο θεμέλιο, αυτό της αναγκαίας απόκτησης κάθε νοητικής δύναμης βαθμιαία. Θα φωτιστεί η καταγωγή του ανθρώπου και η ιστορία του. (Darwin, 1859, σ. 488 – δεν ακολουθείται η μετάφραση του παραθέματος στην ελληνική έκδοση της *Καταγωγής* [=Η *Καταγωγή των Ειδών*, Β' Τόμος, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, επανέκδοση για την εφημερίδα *Το Βήμα*, 2009, σ. 205], γιατί συμπίπτει ελάχιστα με το παράθεμα από την έκδοση του *Origin* που χρησιμοποιείται στο ανά χειράς βιβλίο.)

Οι βιογράφοι του Δαρβίνου, Adrian Desmond και James Moore (2009), έχουν διατυπώσει τον ενδιαφέροντα ισχυρισμό ότι η απέχθεια του Δαρβίνου για τη δουλεία τον έκανε να θέλει να δείξει πως όλοι οι άνθρωποι είχαν την ίδια καταγωγή. Ωστόσο, ο Δαρβίνος δεν εξέθεσε παρά το 1871, πλέον, τις απόψεις του για την ανθρώπινη εξέλιξη, λέγοντας πως «θα



**Εικόνα 1.1** Σκελετοί γίββωνα, γορίλλα, χιμπατζή, ουρακοτάγκου και ανθρώπου. Μια εικόνα σαν αυτήν υπήρχε στο βιβλίο του Huxley, χρησιμεύοντας ως ένδειξη των ομοιοτήτων στη σκελετική δομή μεταξύ αυτών των ομάδων. Εικόνα © Morphant Creation.

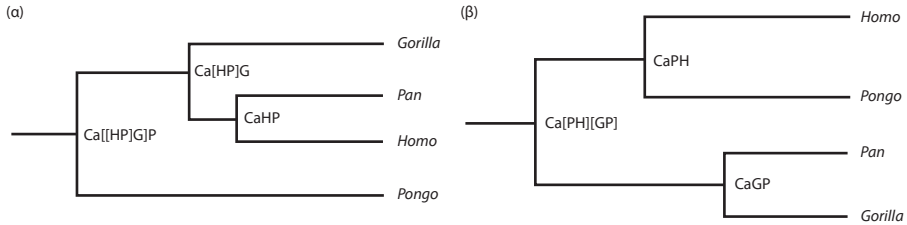


**Εικόνα 1.2** Μία από τις συνηθισμένες παραπλανητικές και εσφαλμένες απεικονίσεις της εξέλιξης εν γένει και της ανθρώπινης εξέλιξης εν προκειμένω. Εικόνα © Williampark.

ήταν πέρα από τα όριά μου, και πέρα από τις γνώσεις μου επίσης, έστω και να κατονομάσω τα αναρίθμητα σημεία στη δομή, στα οποία ο άνθρωπος ταιριάζει με τα άλλα Πρωτεύοντα» (Darwin, 1871, σ. 191). Έπειτα παρέθεσε τα λόγια του Huxley, που, αφού μελέτησε τα διαθέσιμα στοιχεία, συμπέρανε ότι:

Οι δομικές διαφορές ανάμεσα στον Άνθρωπο και τους ανθρωποειδείς πιθήκους σίγουρα δικαιώνουν το να θεωρούμε, γι' αυτόν, πως απαρτίζει μια οικογένεια ξεχώρητη από κείνους, και μολαταύτα, εφόσον διαφέρει λιγότερο από εκείνους, απ' ό,τι εκείνοι από άλλες οικογένειες της ίδιας τάξης, δεν μπορεί να υπάρξει τίποτε που να δικαιολογεί την κατάταξή του σ' άλλη τάξη. Ο Λιναίος δικαιώνεται, και ένας αιώνας ανατομικής έρευνας μας οδηγεί πίσω στους συμπερασμούς του, πως ο άνθρωπος είναι μέλος της ίδιας τάξης (για την οποία ο όρος ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ του Λιναίου θα πρέπει να διατηρηθεί) με τους Πιθήκους και τους Λεμούριους. (Huxley, 1863, σ. 124)

Η Εικόνα 1.1 δείχνει τις ομοιότητες στη σκελετική δομή ανάμεσα στους ανθρώπους και τα άλλα πρωτεύοντα. Από τότε, πολλά ανθρώπινα απολιθώματα έχουν βρεθεί (για μια επισκόπηση, βλ. Tattersall, 1998· Wood, 2005). Όπως είχε υποθέσει ο Δαρβίνος, τώρα δείχνει ξεκάθαρα ότι οι άνθρωποι προήλθαν από την Αφρική (Tattersall, 2009) και νέες ενδείξεις συμβάλλουν συνεχώς σε μια καλύτερη κατανόηση της ανθρώπινης εξέλιξης (π.χ., White *et al.*, 2009· Berger *et al.*, 2010). Ωστόσο, η ιδέα της εξέλιξης εν γένει και της ανθρώπινης εξέλιξης συγκεκριμένα, συνήθως παραποιείται στη δημόσια σφαίρα, με απεικονίσεις όπως αυτή στην Εικόνα 1.2. Υπάρχουν δύο κύρια προβλήματα με τούτη την απεικόνιση της ανθρώπινης εξέλιξης. Κατά πρώτον, εικονίζει την εξέλιξη ως μια γραμμική διαδικασία όπου κάθε είδος μεταβάλλεται σ' ένα άλλο. Όπως θα εξηγηθεί στα Κεφάλαια 4 και 5, η εξέλιξη εικονίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ως διαδικασία διακλάδωσης και όχι ως γραμμική. Κατά δεύτερον, τούτη η απεικόνιση δείχνει τους ανθρώπους να έχουν εξελιχθεί από τους πιθή-

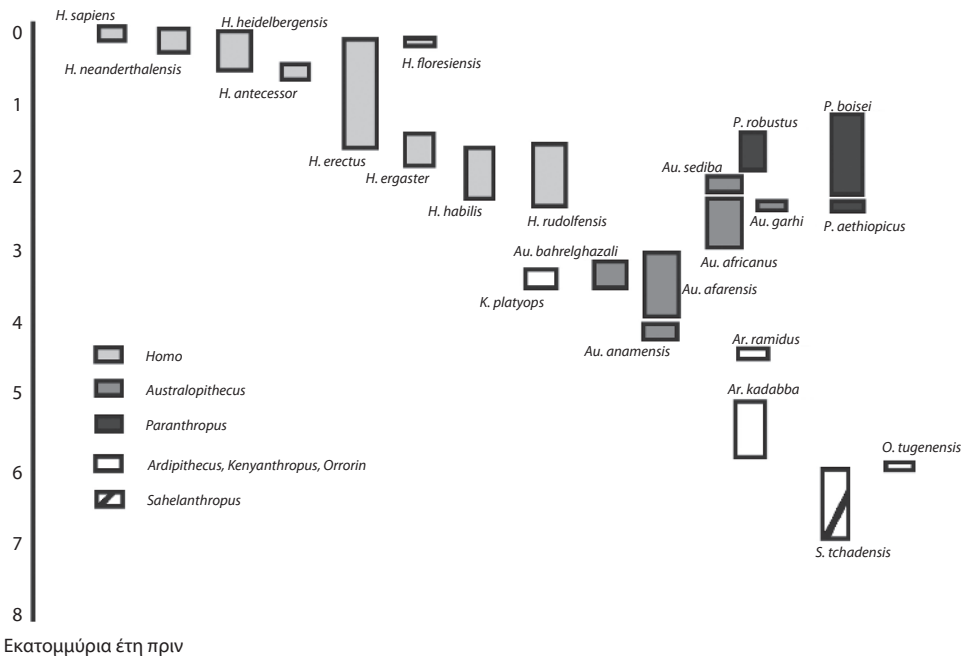


**Εικόνα 1.3** (α) Οι άνθρωποι και οι χιμπατζήδες εικονίζονται ως τα πιο στενά σχετιζόμενα γένη επειδή ο κοινός πρόγονός τους ( $CaHP$ ) βρίσκεται εγγύτερα στο παρόν. Έχουν επίσης έναν κοινό πρόγονο με τους γορίλλες ( $Ca[HP]G$ ), ενώ οι ουρακοτάγκοι συγγενεύουν λιγότερο με τους ανθρώπους μιας και μοιράζονται μαζί τους τον παλαιότερο από τους κοινούς προγόνους ( $Ca[[HP]G]P$ ) (προσαρμοσμένο από το Fabre *et al.*, 2009) (*Homo*: άνθρωποι· *Pan*: χιμπατζήδες· *Pongo*: ουρακοτάγκοι). (β) Οι χιμπατζήδες και οι γορίλλες εικονίζονται ως τα πιο συγγενή γένη, καθώς έχουν έναν σχετικά πρόσφατο κοινό πρόγονο ( $CaGP$ ). Οι άνθρωποι εικονίζονται εγγύτερα στους ουρακοτάγκους, έχοντας αποκλίνει απ' τον κοινό τους πρόγονο ( $CaPH$ ) σε προγενέστερες εποχές, σε σύγκριση με τους χιμπατζήδες και τους γορίλλες. Τέλος, τα δύο ζεύγη έχουν έναν κοινό πρόγονο ( $Ca[PH][GP]$ ) από τον οποίο εξελίχθηκε κάθε γένος (προσαρμοσμένο από τους Grehan & Schwartz, 2009) (*Homo*: άνθρωποι· *Pan*: χιμπατζήδες· *Pongo*: ουρακοτάγκοι). Το πώς κατασκευάζονται τα εξελικτικά δέντρα και το τι είδους πληροφορίες παρέχουν, εξετάζονται καταλεπτώς στο Κεφάλαιο 5.

κους. Αυτό είναι επίσης παραπλανητικό, επειδή ένα είδος δεν μπορεί να εξελιχθεί από ένα άλλο σύγχρονο είδος. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι ότι οι άνθρωποι και οι πίθηκοι έχουν κοινούς προγόνους από τους οποίους έχουν εξελιχθεί ανεξάρτητα, σαν κλώνοι που ξεκινούν από έναν κοινό βλαστό. Η κοινή καταγωγή και η εξελικτική αλλαγή, ή η καταγωγή με τροποποίηση, όπως το διατύπωσε ο Δαρβίνος, εξηγούνται στα Κεφάλαια 5 και 6, αντίστοιχα.

Πρόσφατες πρόοδοι, όπως η συγκριτική γονιδιωματική και οι αναλύσεις της έκφρασης των αλληλουχιών DNA, έχουν συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της ανθρώπινης εξέλιξης (Carroll, 2003). Μοριακές ενδείξεις στηρίζουν το συμπέρασμα, βασισμένο σ' απολιθώματα, ότι οι άνθρωποι και οι πίθηκοι συγγενεύουν στενά. Το συμπέρασμα από μια μοριακή ανάλυση η οποία εστιασθηκε σε 27 (από συνολικά 43 πυρηνικές και 15 μιτοχονδριακές) κωδικές αλληλουχίες DNA, με δειγματοληψία από το 73% έως το 85% των ειδών πρωτευόντων (Fabre *et al.*, 2009), ήταν πως οι άνθρωποι συγγενεύουν πιο στενά με τους χιμπατζήδες (γένος *Pan*) απ' ό,τι οι τελευταίοι με τους γορίλλες (γένος *Gorilla*) (Εικόνα 1.3α). Μια άλλη σειρά ενδείξεων βασισμένη σε δομικούς, συμπεριφορικούς και φυσιολογικούς χαρακτήρες, ίσως όχι ισάξιου κύρους με της μοριακής φυλογένεσης, υποδηλώνει πως οι άνθρωποι και οι ουρακοτάγκοι (γένος *Pongo*)





**Εικόνα 1.4** Αυτό δεν είναι ένα εξελικτικό δέντρο όπως εκείνα που φαίνονται στην Εικόνα 1.3, επειδή τα είδη δεν συνδέονται με γραμμές. Έχουμε μονάχα αποσπασματικά δεδομένα σχετικά με την ανθρώπινη εξέλιξη, και πολλά ακόμα λείπουν. Τα διάφορα κουτιά έχουν διαφορετικά μήκη, τα οποία αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα (εκατομμύρια χρόνια) κατά το οποίο οι επιστήμονες έχουν βρει απολιθώματα αυτών των ειδών. Τα διάφορα είδη δεν συνδέονται με γραμμές, επειδή οι επιστήμονες δεν γνωρίζουν τις ακριβείς εξελικτικές σχέσεις (προσαρμοσμένο από το Wood, 2010). Παρά τις λεπτομέρειες που λείπουν, έχουμε ωστόσο μια καλή αίσθηση του πώς συνέβη η εξέλιξή μας. Σ' αυτή την εικόνα χρησιμοποιούνται δύο λέξεις για την ονομασία κάθε είδους· η πρώτη αναφέρεται στο γένος και η δεύτερη στο είδος. Το είδος μας αποκαλείται *Homo sapiens*· η λέξη *Homo* δείχνει το γένος και η λέξη *sapiens* το είδος.

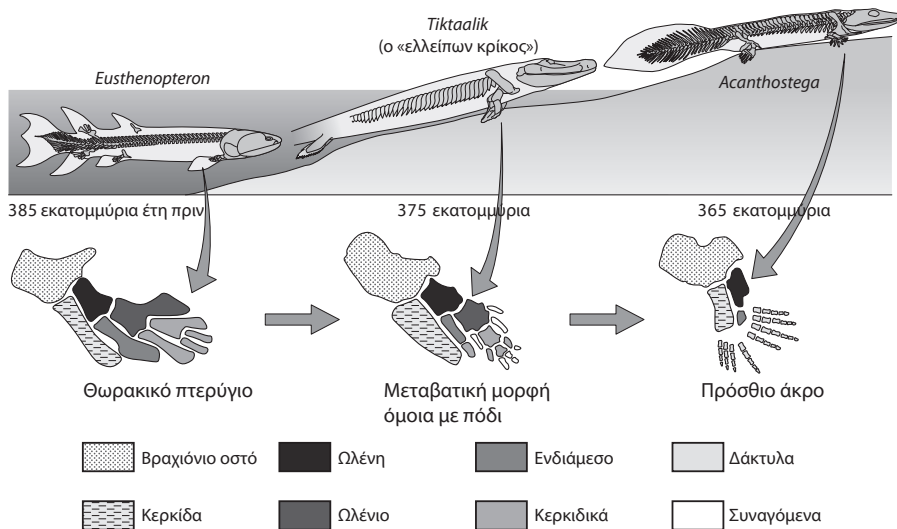
έχουν έναν κοινό πρόγονο που δεν τον μοιράζονται με τους υπάρχοντες αφρικανικούς πιθήκους (Grehan & Schwartz, 2009) (Εικόνα 1.3β). Σίγουρα ακόμα λείπουν πολλές λεπτομέρειες για το πώς συνέβη η ανθρώπινη εξέλιξη. Προς το παρόν έχουμε πολλά σκόρπια κομμάτια από ολόκληρο το παζλ (Εικόνα 1.4). Ωστόσο, η στενή σχέση ανάμεσα στους ανθρώπους και τα πρωτεύοντα ενισχύεται σταθερά από πολλά διαφορετικά είδη ενδείξεων που έχουμε σήμερα στη διάθεσή μας.

Η δεύτερη σειρά ενδείξεων είναι συνέπεια της ικανότητας των εξελικτικών βιολόγων να κάνουν προβλέψεις βασισμένες σε υπάρχουσες ενδείξεις και να τις ελέγχουν ως προς αυτές. Μπορεί να αναζητούν συγκεκριμένα απολιθώματα ή οργανισμούς σε συγκεκριμένα μέρη, ή συγκεκριμέ-

νες ομοιότητες ανάμεσα σε συγκεκριμένες αλληλουχίες DNA ορισμένων οργανισμών. Και τα δύο είδη πρόβλεψης όχι μόνον έχουν επαυξηθίμως επιβεβαιωθεί μέχρι σήμερα, αλλά έχουν επίσης δώσει νέες ενδείξεις του ίδιου είδους. Θα μπορούσατε ίσως να κάνετε κάτι παρόμοιο με την αγαπημένη σας τηλεοπτική σειρά. Θα μπορούσατε να προβλέψετε ότι ο παραγωγός της ή ένα μέλος του καστ θα είχε αντίγραφα των παλαιών επεισοδίων ή ένα αντίγραφο του σεναρίου. Ίσως θα τον αναζητούσατε, ώστε να του ζητήσετε τούτα τα αντίγραφα. Ή θα μπορούσατε να προβλέψετε ότι κάποιοι λάτρεις της σειράς θα είχαν ό,τι θέλετε, άρα θα αναζητούσατε τους ιστότοπους ή τα μπλογκ τους. Θα μπορούσατε, επίσης, να αναρτήσετε ένα αίτημα στη δική σας ιστοσελίδα. Φυσικά, οι εξελικτικοί βιολόγοι δεν μπορούν να βρουν ενδείξεις με αγγελίες του τύπου «ζητείται το τάδε ή το δείνα απολιθώμα». Πρέπει να τα αναζητήσουν από μόνοι τους. Μολοντούτο, συχνά γνωρίζουν πολύ καλά πού να ψάξουν για ενδείξεις, και οι προσπάθειές τους έχουν στεφθεί μ' αρκετή επιτυχία. Σε μερικές περιπτώσεις, οι προβλέψεις τους ίσως να 'ναι κιόλας πιο επιτυχείς από τις δικές σας απόπειρες να ανακαλύψετε τι συνέβη πρωτύτερα στην τηλεοπτική σειρά που παρακολουθείτε, επειδή έχουν πιο στερεή βάση για να κάνουν αυτές τις προβλέψεις.

Αν και η εξέλιξη των τετραπόδων (σπονδυλωτών με τέσσερα άκρα) από τους σαρκοπτερύγιους (λοβοπτερύγιους) ιχθύς ήταν γενικά αποδεκτή, υπήρχαν λίγα απολιθώματα που θα μπορούσαν να υποδηλώσουν πώς θα μπορούσε να έχει συμβεί τούτη η εξέλιξη. Η ανακάλυψη του *Tiktaalik* στον Καναδά έχει συνεισφέρει σε τεράστιο βαθμό στις σημερινές γνώσεις μας σχετικά με τη μετάβαση από τους ιχθύς στα τετράποδα (Εικόνα 1.5). Ο σκελετός του αντιπροσωπεύει μια μεταβολή από τη δομή των πρωτόγονων σαρκοπτερύγιων ιχθύων προς τη δομή των τετραπόδων (Daeschler *et al.*, 2006· Shubin *et al.*, 2006). Αλλά ακόμα πιο ενδιαφέρον είναι το πώς και το γιατί αυτοί οι επιστήμονες αποφάσισαν να αναζητήσουν τα συγκεκριμένα απολιθώματα στη συγκεκριμένη τοποθεσία όπου το έκαναν. Στην προσωπική του περιγραφή της ανακάλυψης, ο Neil Shubin (2008, σ. 4-5) έγραψε: «Οι περισσότεροι δεν γνωρίζουν πως η ανακάλυψη απολιθωμάτων είναι κάτι που μπορεί συχνά να γίνει με εκπληκτική ακρίβεια και προβλεψιμότητα. [...] Φυσικά, δεν έχουμε 100 τοις εκατό επιτυχία, αλλά χτυπάμε τόσο συχνά φλέβα χρυσού, ώστε τα πράγματα να καθίστανται ενδιαφέροντα». Ο Shubin έπειτα περιγράφει πώς αυτός και οι συνάδελφοί του έλαβαν υπόψη προηγούμενες ανακαλύψεις κι αποφάσισαν πού να ψάξουν γι' απολιθώματα οργανισμών οι οποίοι θα ήταν ενδιαμέσες μορφές ανάμεσα στους ιχθύς και τα τετράποδα. Έπρεπε να βρουν πετρώματα από τη σωστή περίοδο, ενός τύπου όπου τα απολιθώματα θα

είχαν διατηρηθεί και εκτεθεί στην επιφάνεια. Γνώριζαν ότι απολιθώματα αμφιβίων είχαν ανακαλυφθεί σε πετρώματα ηλικίας περίπου 365 εκατομμυρίων ετών κι ότι απολιθώματα ιχθύων είχαν βρεθεί σε πετρώματα με ηλικία περίπου 385 εκατομμύρια έτη. Επομένως, θα έπρεπε να αναζητήσουν μεταβατικές μορφές σε πετρώματα ηλικίας 365-385 εκατομμυρίων ετών. Επιπλέον, γνωρίζοντας ότι τα απολιθώματα στα ιζηματογενή πετρώματα συνήθως διατηρούνται, έπρεπε να ψάξουν για πετρώματα σχηματισμένα σ' ωκεανούς, λίμνες ή ποτάμια, αποκλείοντας τα ηφαιστειογενή και τα μεταμορφικά, όπου ήταν απίθανο να βρεθούν απολιθώματα ιχθύων. Τέλος, ήθελαν να βρουν περιοχές που δεν ήταν κατοικημένες και όπου τα απολιθώματα μπορεί να ήταν εκτεθειμένα στην επιφάνεια των πετρωμάτων. Ο Shubin και οι συνάδελφοί του κατέληξαν στο ότι η καναδική Αρκτική ήταν της κατάλληλης περιόδου, τύπου και έκθεσης, και πως επίσης ήταν άγνωστη στους παλαιοντολόγους σπονδυλωτών. Ως εκ τούτου, ανταποκρινόταν σ' όλα τα κριτήριά τους. Και εκεί, στον Σχηματισμό Φραμ της περιφέρειας Νούναβουτ στον Καναδά, ανακαλύφθηκε τελικά το *Tiktaalik*, όπως το είχαν προβλέψει (Shubin, 2008, σ. 4-27). Αυτή η ανακάλυψη απαίτησε, φυσικά, πολύ χρόνο, χρήμα και προσπάθεια. Το σημαντικό, ωστόσο, είναι ότι βασίστηκε σε έγκυρες επιστημονικές προβλέψεις.



**Εικόνα 1.5** Τα απολιθώματα του *Tiktaalik* βρέθηκαν εκεί όπου προβλέφθηκε ότι θα βρίσκονται, και παρέχουν ενδείξεις για το πώς θα μπορούσε να έχει συμβεί η μετάβαση από τους ιχθύς στα τετράποδα (βασισμένο στους Daeschler *et al.*, 2006· Shubin *et al.*, 2006). Λάβετε υπόψη πως αυτή η εικόνα δεν παρουσιάζει την πραγματική μετάβαση, αλλά μόνο το πώς θα ήταν, ίσως, δυνατή. Το *Tiktaalik* δεν είναι η ενδιάμεση μορφή ή ο «ελλείπων κρίκος», αλλά μια μορφή που του μοιάζει. Εικόνα © Simon Tegg.

Η τρίτη σειρά ενδείξεων χαρακτηρίζει ακόμα πιο έντονα την επιστήμη. Σε αντίθεση με την αγαπημένη σας τηλεοπτική σειρά, της οποίας η ιστορία ήταν προϊόν ανθρωπίνης φαντασίας, η ιστορία της ζωής στη Γη είναι προϊόν αληθινών συμβάντων βασισμένων σε φυσικές αιτιακές διεργασίες όπως η μετάλλαξη/ο ανασυνδυασμός, η μετανάστευση, η παρέκκλιση, η επιλογή. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αυτές οι διεργασίες μπορούν να προκαλέσουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού. Για παράδειγμα, η μετάλλαξη/ο ανασυνδυασμός μπορούν να δημιουργήσουν νέες αλληλουχίες DNA και πιθανώς νέους χαρακτήρες σ' έναν πληθυσμό. Στις επόμενες γενεές, ο πληθυσμός θα διαφέρει από τον αρχικό· έτσι, θα έχει συμβεί εξέλιξη. Στην περίπτωση της μετανάστευσης, κάποια άτομα θα μπορούσαν να μεταναστεύσουν σε νέες περιοχές, δημιουργώντας έναν νέο πληθυσμό που θα μπορούσε να 'ναι διαφορετικός από τον αρχικό εάν μετανάστευαν κάποιοι τύποι ατόμων μα όχι άλλοι από τον αρχικό πληθυσμό. Η παρέκκλιση προκύπτει από το τυχαίο δείγμα ατόμων, ανεξάρτητα από τους χαρακτήρες που αυτά έχουν κι από το αν αυτοί τους προσφέρουν ή όχι κάποιο συγκεκριμένο πλεονέκτημα. Μερικά άτομα, όμως όχι άλλα, μπορεί να αναπαραχθούν· έτσι, η δομή του πληθυσμού θα μπορούσε ν' αλλάξει – όσο πιο μικρός είναι ο πληθυσμός τόσο πιο σημαντικό θα ήταν το αποτέλεσμα. Τέλος, κατά τη διεργασία της επιλογής κάποια άτομα κατορθώνουν να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν διότι έχουν χαρακτήρες που συμβάλλουν σ' αυτό, ενώ άλλα, που δεν τους έχουν, αποτυγχάνουν να επιβιώσουν ή να αναπαραχθούν. Αυτές οι διεργασίες εξετάζονται με περισσότερο λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 6.

Οι επιστήμονες μπορούν να κάνουν προβλέψεις για μελλοντικές εκβάσεις βασισμένες στην κατανόησή τους πάνω στο πώς συμβαίνουν αυτές οι διεργασίες.<sup>8</sup> Να σας δώσω ένα παράδειγμα. Φανταστείτε έναν πληθυσμό αποτελούμενο από πράσινα σκαθάκια και καφέ σκαθάκια, σ' ένα δάσος· το χρώμα τους είναι κληρονομικός χαρακτήρας, το αλληλόμορφο<sup>9</sup> για το καφέ χρώμα είναι επικρατές<sup>10</sup> και οι ετεροζυγώ-

8 Το αν αυτές οι διεργασίες βασίζονται σε νόμους ή όμοιες με νόμους (νομολογικές) αρχές, είναι μια συζήτηση πέρα από το πλαίσιο του ανά χειράς βιβλίου (βλ. Sober, 1997· McShea & Brandon, 2010).

9 Ένα αλληλόμορφο είναι μία από πολλές παραλλαγές μιας συγκεκριμένης αλληλουχίας DNA, που «κωδικοποιεί» μια συγκεκριμένη πρωτεΐνη ή μόριο RNA και έτσι επηρεάζει μια συγκεκριμένη βιολογική διαδικασία. Τα αλληλόμορφα ταυτίζονται με συγκεκριμένα τμήματα των χρωμοσωμάτων, τα οποία αποκαλούνται γενετικοί τόποι (loci, εν. locus).

10 Η επικράτηση είναι μια έννοια που πιθανώς έχετε ακούσει στο μάθημα της γενετικής στο σχολείο· ένα επικρατές αλληλόμορφο είναι αυτό που «εκφράζεται», και το

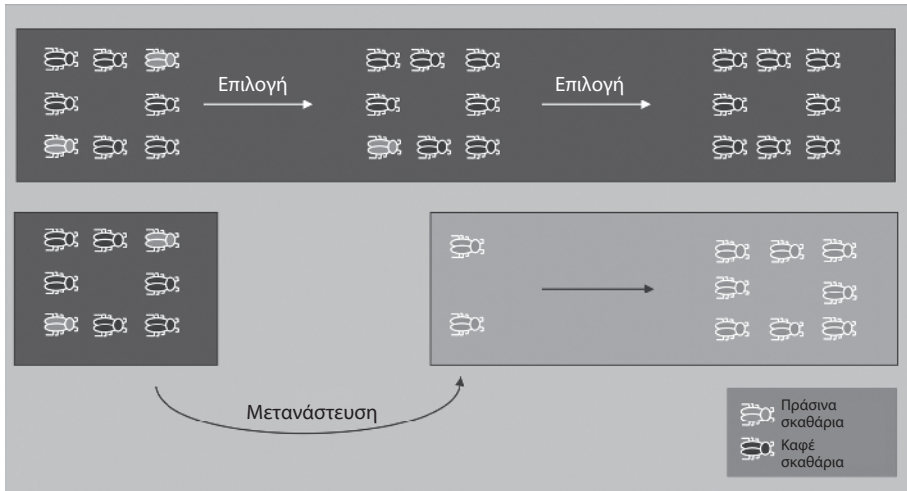
τες<sup>11</sup> έχουν καφέ χρώμα· τα πουλιά μπορούν να εντοπίζουν τα πράσινα σκαθάρια στο έδαφος και στους κορμούς των δέντρων πιο εύκολα απ' ό,τι τα καφέ· και επίσης, τα πουλιά μπορούν να εντοπίζουν τα καφέ σκαθάρια πάνω στα φύλλα και στα πράσινα μέρη των φυτών πιο εύκολα απ' ό,τι τα πράσινα. Ύπ' αυτές τις συνθήκες, και οι δύο τύποι σκαθαριού υπάρχουν σε μια συγκεκριμένη αναλογία (25% πράσινα, 75% καφέ) στη συγκεκριμένη περιοχή. Μπορεί να προβλεφθεί ότι, υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, ένας τέτοιος πληθυσμός μπορεί να εξελιχθεί.

Εάν εισαχθεί ένας νέος θηρευτής που ζει στο έδαφος και δεν μπορεί να διακρίνει τα καφέ σκαθάρια οπότε τρέφεται μόνο με πράσινα, ύστερα από μερικές γενεές ο συνολικός αριθμός των καφέ σκαθαριών κατά πάσα πιθανότητα θα αυξηθεί. Στο έδαφος, τα καφέ σκαθάρια έχουν ένα πλεονέκτημα επειδή καταφέρνουν να κρύβονται, ενώ τα πράσινα είναι πιο πιθανό να γίνουν λεία του νέου θηρευτή. Επομένως, μπορεί κανείς να προβλέψει ότι ύστερα από μερικές γενεές ο πληθυσμός μάλλον θα αλλάξει και πλέον θα αποτελείται κυρίως από καφέ σκαθάρια. Αυτό θα οφείλεται στο ότι τα καφέ σκαθάρια (και/ή η αλληλουχία DNA που εμπλέκεται στην παραγωγή του καφέ χρώματος) θα επιλεγούν. Όταν υπάρχει γενετική και ως εκ τούτου φαινοτυπική<sup>12</sup> ποικιλότητα σ' έναν πληθυσμό (το πράσινο και το κα-

---

υπολειπόμενο είναι εκείνο που δεν «εκφράζεται», όταν τα φέρει μαζί ο ίδιος (ετερόζυγος) οργανισμός. Αυτή η έννοια είναι προβληματική, καθώς στην πραγματικότητα αναφέρεται σε μια μειονότητα παρά σε μια πλειονότητα περιπτώσεων (βλ. Allchin, 2005· Jamieson & Radick, 2013). Ωστόσο, για λόγους κατανόησης θα χρησιμοποιούμπε περιστασιακά την τυπική ορολογία της μεντέλεια γενετικής που χρησιμοποιείται στη σχολική βιολογία, καθώς θα είναι οικεία στους πιο πολλούς αναγνώστες του ανά χείρας βιβλίου.

- 11 Ένα άτομο που φέρει δύο διαφορετικά αλληλόμορφα αποκαλείται ετεροζυγώτης. Ένα άτομο που φέρει το ίδιο αλληλόμορφο και στα δύο ομόλογα χρωμοσώματα αποκαλείται ομοζυγώτης.
- 12 Το ποια αλληλόμορφα έχει ένα άτομο υπαγορεύει τον γονιδιότυπό του. Το αποτέλεσμα της έκφρασης αυτών των αλληλόμορφων είναι ο φαινότυπός του. Τα αλληλόμορφα μπορεί να αλληλεπιδρούν με διάφορους τρόπους παράγοντας τον φαινότυπο. Ένα ομόζυγο άτομο συνήθως έχει έναν συγκεκριμένο φαινότυπο ο οποίος καθορίζεται από τ' αλληλόμορφα του. Σύμφωνα με τη μεντέλεια γενετική, που συνήθως διδάσκεται στη σχολική βιολογία, σ' έναν ετεροζυγώτη το ένα αλληλόμορφο μπορεί να εκφράζεται (επικρατές), ενώ το άλλο όχι (υπολειπόμενο), ή σ' άλλες περιπτώσεις και τα δύο αλληλόμορφα μπορεί να συνεισφέρουν στον παρατηρούμενο φαινότυπο (συνεπικρατή). Πρέπει να ληφθεί υπόψη, ωστόσο, ότι το πώς τα αλληλόμορφα επηρεάζουν τον φαινότυπο είναι πολύ πιο περίπλοκο απ' αυτή την απλή περιγραφή, επειδή η επίδραση ενός αλληλόμορφου σ' έναν γενετικό τόπο μπορεί να κρύβει την επίδραση ενός αλληλόμορφου σε έναν άλλο τόπο (επίσταση) ή να επηρεάζει πολλά φαινόμενα μέσα στον οργανισμό (πλειοτροπία) όταν, π.χ., μια πρωτεΐνη επιτελεί

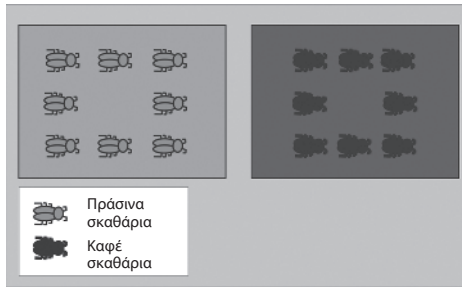


**Εικόνα 1.6** Επιλογή και μετανάστευση· σε κάθε περίπτωση, απεικονίζονται μάλλον οι αναλογίες παρά οι πραγματικοί αριθμοί των οργανισμών κάθε τύπου (βλ. στο κείμενο, για τις λεπτομέρειες της διεργασίας).

φέ χρώμα είναι κληρονομικοί χαρακτήρες, δηλαδή παράγονται μέσω της έκφρασης συγκεκριμένων αλληλουχιών DNA), μπορεί να συμβεί φυσική επιλογή. Δεν είναι όλοι οι οργανισμοί εξίσου ικανοί να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν σ' ένα συγκεκριμένο περιβάλλον· κάποιοι θα το καταφέρουν και κάποιοι άλλοι όχι. Οι πρώτοι είναι εκείνοι που, όπως λέγεται, επιλέγονται. Φυσικά, δεν υπάρχει κάποιος εξωτερικός παράγοντας που κάνει οποιοδήποτε είδους επιλογή, αλλά θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι το περιβάλλον υποκινεί την ασυνείδητη επιλογή κάποιων οργανισμών, ενώ άλλοι εκλείπουν. Τούτου δοθέντος, μπορούμε να προβλέψουμε ότι τα πράσινα σκαθάρια σε τούτη την περιοχή κάποια στιγμή θα πάψουν να υπάρχουν και ότι ο αρχικός πληθυσμός θα εξελιχθεί σε πληθυσμό που θα αποτελείται αποκλειστικά από καφέ σκαθάρια (Εικόνα 1.6).

Τώρα αναλογιστείτε ξανά τον αρχικό πληθυσμό, που αποτελούνταν κατά 75% από καφέ σκαθάρια και κατά 25% από πράσινα. Φανταστείτε ότι σε μιαν άλλη περιοχή έτυχε να μεταναστεύσουν μονάχα μερικά πράσινα σκαθάρια (αλλά ούτε ένα καφέ), όπου μπορούν να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν δίχως σημαντική επιλεκτική πίεση. Αν και τα καφέ σκαθάρια ήταν πιο πολλά στον αρχικό πληθυσμό, μόνο πράσινα σκαθάρια μετανάστευσαν και ούτε αυτά ούτε οι απόγονοί τους φέρουν το αλληλόμορ-

πολλές ξεχωριστές λειτουργίες ή εκφράζεται σε πολλούς ιστούς (για λεπτομέρειες, βλ. Stern, 2011).

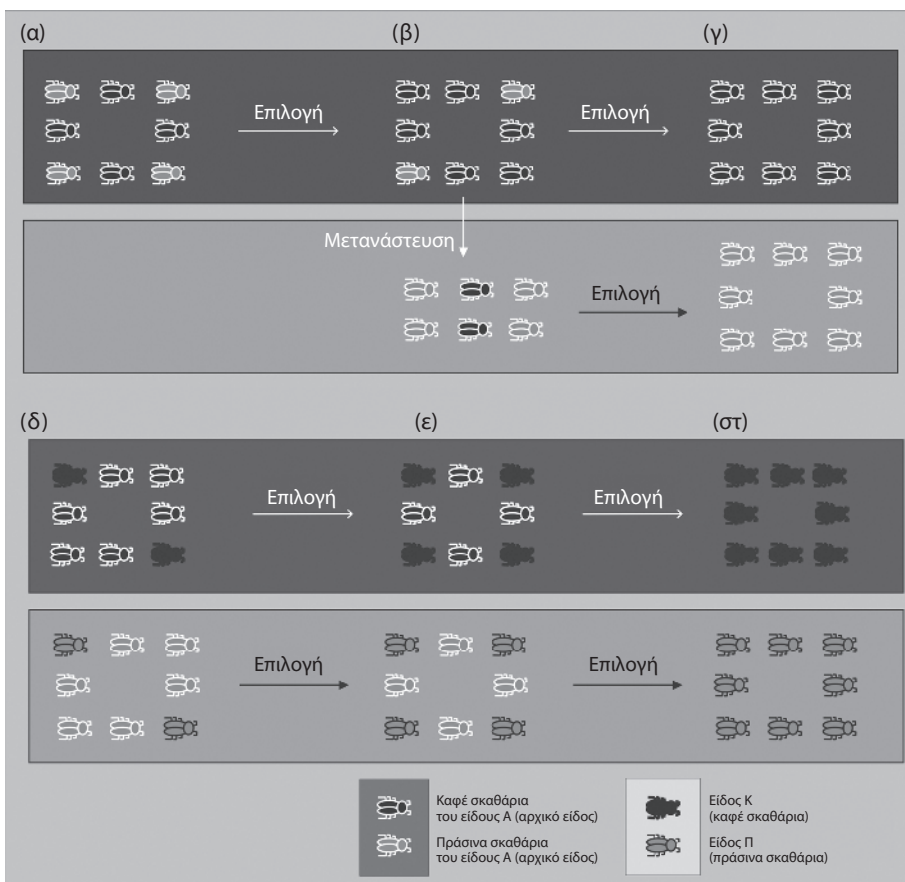


**Εικόνα 1.7** Δύο πληθυσμοί σκαθαριών που ζουν σε διαφορετικές περιοχές. Αυτό είναι το αποτέλεσμα μιας εξελικτικής διεργασίας. Ένας εξελικτικός βιολόγος θα ρωτούσε πόσο στενά συνδεδεμένοι είναι αυτοί οι πληθυσμοί, δηλαδή αν ανήκουν ή όχι στο ίδιο είδος, και πώς (και πότε) απέκλιναν από τον κοινό πρόγονό τους.

φο για το καφέ χρώμα (αν το έφεραν, θα ήταν καφέ). Συνέπεια αυτής της διεργασίας είναι ότι θα υπάρξει μια απόκλιση από την αρχική συχνότητα των πράσινων σκαθαριών (25%) στην παλαιά περιοχή, προς μια νέα (100%) στην περιοχή όπου μετανάστευσαν. Τούτου δοθέντος, μπορεί κάποιος να προβλέψει ότι τα σκαθάρια που μετανάστευσαν στη νέα περιοχή πιθανώς θα δημιουργήσουν εκεί έναν νέο πληθυσμό αποτελούμενο αποκλειστικά από πράσινα σκαθάρια (Εικόνα 1.6). Με την πάροδο αρκετού χρόνου, αυτός ο πληθυσμός και εκείνος στην αρχική περιοχή θα μπορούσαν υπό την επίδραση της επιλογής να εξελιχθούν ανεξάρτητα σε δύο διαφορετικά είδη σκαθαριών, ένα με καφέ χρώμα και ένα με πράσινο, τα οποία θα είναι διακριτά το ένα από τ' άλλο, καθώς και από τ' αρχικό (βλ. Εικόνες 1.7 και 1.8, για ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διεργασίας). Αυτό απαιτεί, φυσικά, να συσσωρευτούν πολλές κληρονομούμενες αλλαγές σε καθέναν από τους δύο αρχικούς πληθυσμούς προτού αυτοί αποκλίνουν αρκετά ώστε να αποτελέσουν διακριτά είδη. Οι λεπτομέρειες της ειδογένεσης εξετάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Απ' όλα τα παραπάνω γίνεται ξεκάθαρο το ότι οι εξελικτικοί βιολόγοι συχνά βγάζουν συμπεράσματα βασισμένα σε έμμεσες ενδείξεις, κάτι που έχει να κάνει με τη μη παρατηρησιμότητα της χρονικής κλίμακας.<sup>13</sup> Ωστό-

13 Η μη παρατηρησιμότητα της χρονικής κλίμακας αναφέρεται στην αδυναμία μας να παρατηρήσουμε συγκεκριμένα συμβάντα και διεργασίες που συμβαίνουν σε χρονική κλίμακα πολύ μεγαλύτερη από τον ανθρώπινο βίο. Ενώ είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε και να μελετήσουμε μικροεξελικτικές διαδικασίες οι οποίες αφορούν σε πληθυσμούς που ανήκουν στο ίδιο είδος, συνήθως είναι αδύνατον να παρατηρήσουμε και να μελετήσουμε μακροεξελικτικές διεργασίες όπως εκείνες που οδηγούν στην εμφάνιση νέων ειδών από προϋπάρχοντα (αν και έχει σταθεί δυνατόν να το παρατηρήσουμε στο εργαστήριο, κάτι που αποκαλείται πειραματική εξέλιξη). Κάποιες μικροεξελικτικές διεργασίες μπορούν να λάβουν χώρα μέσα σε σύντομες χρονικές περιόδους (π.χ., εβδομάδες στην περίπτωση βακτηρίων ή ετών στην περίπτωση σπίνων – για λεπτομέρειες, βλ. στο κείμενο). Αντιθέτως, οι μακροεξελικτικές διεργασίες συνήθως εκτείνονται σε χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρόνια· έτσι, είναι αδύνατον για τους ανθρώπους



**Εικόνα 1.8** Υποθετικό εξελικτικό σενάριο για την εξέλιξη των δύο ειδών σκαθαριών (του πράσινου και του καφέ) από έναν κοινό πρόγονο. Οι εξελικτικοί βιολόγοι σχεδιάζουν τέτοια σενάρια και μετά τα ελέγχουν αντιπαραβάλλοντάς τα με τις ενδείξεις. Σε κάθε περίπτωση, απεικονίζονται οι αναλογίες και όχι οι πραγματικοί αριθμοί των οργανισμών κάθε τύπου. Ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από καφέ και πράσινα σκαθάρια. Στο (α) ένας νέος θηρευτής προκαλεί επιλογή και πιο πολλά πράσινα σκαθάρια –απ’ότι καφέ– πεθαίνουν. Στο (β) μερικά σκαθάρια μεταναστεύουν σ’ ένα νέο περιβάλλον όπου τα πράσινα πλεονεκτούν ως προς τα καφέ. Εξαιτίας του διαφορετικού είδους επιλογής στα δύο περιβάλλοντα, τα καφέ σκαθάρια επικρατούν στην παλαιά περιοχή και τα πράσινα επικρατούν στη νέα (γ). Ο πληθυσμός μπορεί να αποικλίνει περαιτέρω (δ-ε) και τελικά να εξελιχθούν (στ) δύο νέα είδη (Κ και Π) που διακρίνονται και αναμεταξύ τους και από το αρχικό (Α).

να τις παρατηρήσουν. Η επιλογή των καφέ σκαθαριών ή η μετανάστευση των πράσινων, που περιγράφονται στο παράδειγμα, είναι μικροεξελικτικές διεργασίες· η εξέλιξη δύο νέων ειδών από εκείνους τους αρχικούς πληθυσμούς είναι μια μακροεξελικτική διεργασία (η μακροεξέλιξη και η ειδογένεση εξετάζονται στο Κεφάλαιο 6).



σο, είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε άμεσα κάποιες εξελικτικές διεργασίες. Ίσως η πιο γνωστή, μελετημένη και χαρακτηριστική να είναι η εξέλιξη των σπίνων στα νησιά Γκαλάπαγκος. Η εξέλιξή τους δείχνει πώς έχουν δράσει στην πραγματικότητα στη φύση η παρέκκλιση και η επιλογή. Όλα τα είδη σπίνου που ζουν σήμερα στα νησιά Γκαλάπαγκος του Εκουαδόρ προέρχονται από ένα κοινό προγονικό είδος που έφτασε στα νησιά από την αμερικανική ήπειρο (Sato *et al.*, 2001). Αυτά τα είδη ζουν ακόμα στο ίδιο περιβάλλον όπου εξελίχθηκαν, και στο πέρασμα των χρόνων έχει παρατηρηθεί πως έχουν εξελίξει βαθμιαία αλλαγές στο μέγεθος του σώματός τους και στο σχήμα του ράμφους τους (Grant & Grant, 2008). Τέτοιες μελέτες βραχείας κλίμακας μπορούν να προσφέρουν σημαντικές γνώσεις για το πώς συμβαίνει η εξέλιξη. Αν και οι ίδιοι οι Grant δέχτηκαν ότι στην περίπτωση τους δεν μπορούσαν εξ αρχής να έχουν προβλέψει καταλεπτώς τα συγκεκριμένα μακροπρόθεσμα εξελικτικά αποτελέσματα (μέσο μέγεθος σώματος και σχήμα ράμφους στο τέλος της μελέτης), σίγουρα μπορούσαν να κάνουν άλλες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις (Grant & Grant, 2002). Οι σπίνου των Γκαλάπαγκος είναι μονοφυλετική ομάδα, καθώς έχουν εξελιχθεί από ένα και μόνον είδος που έφτασε από την αμερικανική ήπειρο. Από τα είδη που θα μπορούσαν πιθανώς να ζήσουν στα Γκαλάπαγκος δεν ζουν όλα εκεί τώρα, αλλά μόνον όσα κατάγονται από τ' αρχικό είδος (η κοινή καταγωγή θα εξεταστεί στο Κεφάλαιο 5). Καθώς περνούσε ο χρόνος και νέες ποικιλίες σπίνου εξελίσσονταν, αυτές διασκορπίστηκαν στα διάφορα νησιά και, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, άλλα άτομα επιβίωσαν και άλλα όχι. Μέσω της φυσικής επιλογής, ο πληθυσμός των σπίνων (και όχι κάθε ξεχωριστό άτομο) προσαρμόστηκε, πράγμα που σημαίνει ότι οι χαρακτηριστές των ατόμων που κατάφεραν να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν εξαπλώθηκαν στον πληθυσμό, ενώ άλλα άτομα εξαλείφθηκαν (η προσαρμογή θα εξεταστεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 6).

Σίγουρα υπάρχουν κάποιες ηθικές ή κοινωνικές αρχές που μπορεί να καθοδηγούν τη συμπεριφορά των χαρακτήρων στην τηλεοπτική σας σειρά. Ωστόσο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συναγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το τι είχε συμβεί σε προηγούμενα επεισόδια, επειδή η ανθρώπινη συμπεριφορά μπορεί φυσικά να παραβιάσει τέτοιου είδους αρχές – π.χ., κάποιος να φερθεί ανήθικα ή αντικοινωνικά. Απεναντίας, οι φυσικές διεργασίες βασίζονται σε αρχές που επιτρέπουν ελέγξιμες προβλέψεις, πολλές από τις οποίες αποδεικνύονται ακριβείς, όπως στην περίπτωση του *Tiktaalik*, παρά το ότι ορισμένες, όπως η φυσική επιλογή, έχουν μια πιθανοκρατική διάσταση. Βασιζόμενοι στην κατανόηση αυτών των αρχών, μέσω της μελέτης απολιθωμάτων και γονιδιωμάτων, καθώς και φυσικών πληθυσμών στη φύση, οι εξελικτικοί βιολόγοι έχουν κατα-

λήξει στο ότι όλα τα υπάρχοντα και τα εξαφανισμένα είδη συνδέονται αναμεταξύ τους κι έχουν αποκλίνει εξελικτικά από έναν κοινό πρόγονο μέσω ολότελα φυσικών διεργασιών μεταβολής. Επομένως, οι οργανισμοί εμφανίζουν ομοιότητες και διαφορές που οφείλονται σ' αυτό το γεγονός, και η ενότητα και η ποικιλότητα της ζωής μπορεί να εξηγηθούν επαρκώς διά της εξελικτικής θεωρίας.

### Ερωτήματα στα οποία απαντά η εξελικτική θεωρία

Σε τούτο το σημείο είναι σημαντικό να επισημάνουμε πως η εξελικτική βιολογία, όπως συνολικά η επιστήμη, δίνει απαντήσεις σε συγκεκριμένους τύπους ερωτημάτων.<sup>14</sup> Η κλασική περιγραφή είναι αυτή που προτάθηκε από τον Ernst Mayr (1961), ο οποίος υποστήριξε ότι η εξελικτική βιολογία δίνει απαντήσεις σε ερωτήματα του τύπου «Γιατί;» (π.χ., γιατί ένας χαρακτήρας υπάρχει ή γιατί έχει εξελιχθεί). Οι αντίστοιχες εξηγήσεις βασίζονται σε απώτερα αίτια που σχετίζονται με την εξελικτική ιστορία ενός είδους. Αυτές διακρίνονται από τις αποκαλούμενες εγγύς εξηγήσεις, οι οποίες αναφέρονται σε εγγύς αίτια, δηλαδή σε αίτια εντός των ατόμων, σχετιζόμενες με τη φυσιολογία τους και με το πώς αναπτύσσονται στην πραγματικότητα οι χαρακτήρες τους. Η διάκριση ανάμεσα στο απώτερο και στο εγγύς έχει θεωρηθεί ως μείζων συμβολή στη φιλοσοφία της βιολογίας (Beatty, 1994).

Η περιγραφή του Mayr έχει τροποποιηθεί ώστε να συμπεριλάβει μian ευρύτερη θεώρηση των εξελικτικών και αναπτυξιακών διεργασιών. Έτσι, οι εγγύς εξηγήσεις είναι δυναμικές εξηγήσεις, για αιτιακά συμβάντα σε επίπεδο ατόμου, συμπεριλαμβανομένης όχι μόνον της αποκωδικοποίησης ενός γενετικού προγράμματος, αλλά επίσης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ γονιδίων, εξωκυτταρικών μηχανισμών και περιβαλλοντικών συνθηκών. Αντίστοιχα, οι εξελικτικές εξηγήσεις είναι (αιτιακές) στατιστικές εξηγήσεις που αναφέρονται σε συμβάντα σε επίπεδο πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένης όχι μόνο της φυσικής επιλογής, αλλά επίσης της μετανάστευσης, της μετάλλαξης, του γενετικού ανασυνδυασμού και της παρέκκλισης (Ariew, 2003). Πρόσφατα, η εγκυρότητα αυτής της διάκρισης έχει αμφισβητηθεί. Δεδομένων όσων γνωρίζουμε σήμερα για το πώς οι αναπτυξιακές και οι εξελικτικές διεργασίες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν η μια την άλλη, ίσως να μην έχει νόημα η διάκριση ανάμεσα σε εξελικτικά και εγγύς αίτια και εξηγήσεις (Laland *et al.*, 2011, 2012).

14 Στις Καταληκτικές παρατηρήσεις μου ασχολούμαι με τα ερωτήματα που δεν μπορεί να απαντήσει η εξελικτική βιολογία.

Αν κάποιος παρατηρήσει με προσοχή το πώς οι εξελικτικοί βιολόγοι εργάζονται στην πραγματικότητα, θα συνειδητοποιήσει ότι, ανάλογα με το πού επικεντρώνονται, μπορεί να έχουν αρκετά διαφορετικούς εξηγητικούς στόχους. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να αναζητούν διαφορετικών ειδών ενδείξεις χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους, σε διαφορετικά μέρη και με διαφορετικούς τύπους ερωτημάτων κατά νου. Υπάρχει μια ποικιλία ερωτημάτων με τα οποία μπορούν να καταπιαστούν οι εξελικτικοί βιολόγοι. Αυτό οφείλεται στο ότι κατ' ουσίαν κάθε βιολογικός χαρακτήρας ή φαινόμενο μπορεί να μελετηθεί υπό μια εξελικτική οπτική. Όταν κάποιος ρωτά γιατί οποιοδήποτε απ' αυτά υπάρχει ή πώς προέκυψε –κοντολογίς, όταν αρχίζει κάποιος να αναρωτιέται σχετικά με την προέλευσή τους–, οι μόνες θεμιτές απαντήσεις βρίσκονται διά της κατανόησης των προτύπων και της δυναμικής των εξελικτικών διεργασιών. Οι εξελικτικοί βιολόγοι που διεξάγουν σήμερα έρευνες παγκοσμίως με αντικείμενο την εξέλιξη έχουν διαφορετικούς εξηγητικούς στόχους, αλλά ουσιαστικά βασίζονται στις ίδιες αρχές, ακριβώς επειδή η εξέλιξη είναι η μόνη λογική και θεμιτή απάντηση σε κάθε ερώτηση σε σχέση με την προέλευση των βιολογικών χαρακτήρων ή φαινομένων. Μ' αυτό δεν θέλω να υπαινιχθώ ότι η εξέλιξη μπορεί να δώσει απάντηση σε κάθε ερώτηση σχετικά με την προέλευση· όπως έχω ήδη αναφέρει για την καταγωγή των ανθρώπων, πολλά ερωτήματα παραμένουν αναπάντητα. Αυτό που εννοώ είναι πως αν τέτοια ερωτήματα απαντώνται ή μπορούν να απαντηθούν, η εξελικτική θεωρία είναι πάντοτε μέρος της απάντησης. Όπως θα εξηγηθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 6, η προέλευση των βιολογικών χαρακτήρων μπορεί να βρεθεί στην εξελικτική ιστορία των αντίστοιχων ειδών.

Και οι εναλλακτικές απαντήσεις; Δεν υπάρχουν άλλες λογικές, θεμιτές ή έγκυρες, πέραν της εξέλιξης. Οι δημιουργιστές και οι οπαδοί του Ευφυούς Σχεδιασμού διατείνονται πως τα είδη δημιουργήθηκαν από έναν ευφυή παράγοντα που σχεδίασε όλους τους χαρακτήρες τους. Δεν θα εμπλακώ σ' αυτή τη συζήτηση, επειδή πολλά έξοχα βιβλία προσφέρουν ισχυρά επιχειρήματα και άφθονες αποδείξεις ενάντια σ' αυτό (π.χ., Eldredge, 2000· Pennock, 2000· Pigliucci, 2002· Ayala, 2006· Prothero, 2007· Sarkar, 2007· Coyne, 2009· Dawkins, 2009· Avise, 2010). Θα επισημάνω μονάχα ότι οι οργανισμοί δεν είναι τεχνουργήματα· μ' άλλα λόγια, δεν είναι σχεδιασμένοι με κάποιον σκοπό.<sup>15</sup> Έτσι, εμφανίζουν πολλούς θε-

15 Υποστηρίζω ότι μεταφορές με μηχανές και τεχνουργήματα δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τους οργανισμούς (Pigliucci & Boudry, 2011· Brigandt, 2013). Αν υπάρχει κάποιος λόγος για κάτι τέτοιο (Bechtel, 2013), θα πρέπει να γίνεται με εξαιρετική προσοχή.

μελιώδεις χαρακτήρες που είναι άχρηστοι ή ακόμα και επιζήμιοι, και που εξηγούνται καλύτερα ως αποτελέσματα της εξέλιξης παρά σχεδιασμού. Μ' αυτό δεν θέλω να αρνηθώ ότι τεχνουργήματα μπορεί να έχουν άχρηστα ή κακοσχεδιασμένα χαρακτηριστικά, αλλά αυτά συνήθως δεν είναι θεμελιώδη για τη λειτουργία τους. Αν είναι, τότε δεν σχεδιάστηκαν σωστά. Αντιθέτως, οι οργανισμοί μπορεί να έχουν θεμελιώδεις χαρακτήρες που είναι άχρηστοι ή επιζήμιοι, ακριβώς επειδή δεν σχεδιάστηκαν αλλά είναι προϊόντα της εξέλιξης (οι διαφορές ανάμεσα στους οργανισμούς και τα τεχνουργήματα θα εξεταστούν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3). Φυσικά, οι εξελικτικοί βιολόγοι δεν γνωρίζουν κάθε λεπτομέρεια της εξελικτικής ιστορίας των ειδών, αλλά παρ' όλα αυτά συμφωνούν ότι αυτή είναι υπαρκτή. Ούτε πρέπει οι διαμάχες μεταξύ εξελικτικών βιολόγων να εκλαμβάνονται ως ένδειξη εξηγητικής ανεπάρκειας της επιστήμης. Οι εξελικτικοί βιολόγοι συμφωνούν ως προς το γεγονός της εξέλιξης και μπορεί να διαφωνούν μόνον ως προς τις λεπτομέρειες. Π.χ., το αν οι άνθρωποι είναι πιο στενοί συγγενείς με τους ουρακοτάγκους ή τους χιμπατζήδες δεν οδηγεί κανέναν στο να αμφισβητήσει την εξελικτική ιστορία του γένους *Homo*.

Οι εξελικτικοί βιολόγοι εστιάζουν είτε στην παρατήρηση, είτε στα πειράματα, είτε και στα δύο, αναζητώντας ενδείξεις. Κάποιοι παρατηρούν είδη στη φύση, ενώ άλλοι διεξάγουν πειράματα σε εργαστήρια. Φυσικά, είναι δυνατόν για έναν εξελικτικό βιολόγο να κάνει και τα δύο. Ανάλογα με το ερευνητικό ερώτημα, οι εξελικτικοί βιολόγοι μπορεί να μετρήχονται τη μία ή την άλλη στρατηγική. Μπορεί να μελετούν διαφορετικά φαινόμενα ή διαφορετικές όψεις του ίδιου φαινομένου. Τα συμπεράσματά τους συμβάλλουν στο ίδιο γενικό πλαίσιο, και οι διαφωνίες ή τα διαφορετικά συμπεράσματα είναι μέρος του παιχνιδιού. Αυτό, ωστόσο, που έχει ενδιαφέρον και δεν γίνεται πάντοτε σαφές, είναι πως οι επιστήμονες μπορεί να εξάγουν διαφορετικών ειδών συμπεράσματα και ως εκ τούτου να υπάρχουν διαφορετικών ειδών διαφωνίες. Έτσι, διαφορετικά συμπεράσματα μπορεί να έχουν συνέπειες για την επιστημονική γνώση και μόνο – π.χ., αν ο τάδε ή ο δείνα παράγοντας ήταν περισσότερο ή λιγότερο σημαντικός στην εξέλιξη –, όμως κάποια άλλα μπορεί να έχουν ευρύτερες επιπτώσεις – π.χ., στο πώς κατανοούμε την ανθρώπινη φύση και τη συμπεριφορά μας. Δύο τέτοια παραδείγματα δίνονται παρακάτω, σε μια προσπάθεια να ξεκαθαριστεί τούτη η διαφορά. Το σημαντικό σημείο είναι ότι οι επιστήμονες είναι άνθρωποι και ως εκ τούτου υπάρχουν διαφορετικοί και κάποιες φορές ιδιοσυγκρασιακοί τρόποι κατανόησης της φύσης. Εντέλει, η επιστήμη είναι μια ανθρώπινη δραστηριότητα.

Ένα παράδειγμα του πρώτου είδους διαφωνίας γίνεται φανερό στα συμπεράσματα του Jerry Coyne από το Πανεπιστήμιο του Σικάγου και

του Sean B. Carroll από το Πανεπιστήμιο του Ουισκόνσιν-Μάντισον. Ο Coyne επικεντρώνεται στη μελέτη της ειδογένεσης –μ’ άλλα λόγια, της διεργασίας διά της οποίας προκύπτουν νέα είδη κατά την εξέλιξη (βλ. Κεφάλαιο 6)– και έχει από κοινού συγγράψει το πλέον καθιερωμένο ακαδημαϊκό βιβλίο στο σχετικό πεδίο (Coyne & Orr, 2004). Η έρευνα του Carroll είναι εστιασμένη στις αλληλουχίες DNA που επηρεάζουν τα σωματικά πρότυπα των ζώων· ο ίδιος συγκαταλέγεται στους πιο σημαντικούς επιστήμονες που έχουν συμβάλει στο νέο πεδίο της εξελικτικής αναπτυξιακής βιολογίας (evolutionary developmental biology, και συχνά, εν συντομία: *evo-devo*· βλ. Κεφάλαιο 5) και έχει συγγράψει, πάνω σ’ αυτό το θέμα, ένα από τα πρώτα βιβλία που απευθύνονται στο ευρύ αναγνωστικό κοινό (Carroll, 2005a). Ο Carroll, όπως και πολλοί άλλοι, είναι υπέρμαχος της άποψης ότι γενετικές αλλαγές σε αλληλουχίες DNA, όχι σε κωδικές αλληλουχίες πρωτεϊνών αλλά σε ρυθμιστικές,<sup>16</sup> που συχνά αποκαλούνται γενετικοί διακόπτες, είναι αυτές που έχουν κατευθύνει τη μορφολογική εξέλιξη – με άλλα λόγια, την εξέλιξη των ζωικών μορφών (Carroll, 2005b). Οι Coyne και Hopi Hoekstra, από το Πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ, έχουν αμφισβητήσει την άποψη του Carroll υποστηρίζοντας πως, κι αν ακόμα αυτό αλήθευε, παραείναι νωρίς για να φτάσουμε σ’ ένα τέτοιο συμπέρασμα. Επιπλέον, έχουν υποστηρίξει ότι η εξέλιξη προχωρά μέσω μεταλλάξεων και στις κωδικές και στις ρυθμιστικές αλληλουχίες DNA, και ενδείξεις εμφανίζουν τις πρώτες να είναι πιο σημαντικές από τις δεύτερες (Hoekstra & Coyne, 2007). Σ’ ένα πρόσφατο βιβλίο, ο David Stern (2011) έχει εξηγήσει ότι χρειάζεται κανείς να λάβει υπόψη τόσο τις αλλαγές σε πληθυσμούς όσο και τις αλλαγές στην ανάπτυξη, ώστε να κατανοήσει την εξέλιξη. Αυτή η διαφωνία είναι πιθανώς τεχνική, αν και έχει σημαντικές επιπτώσεις ως προς τα πού θα έπρεπε να εστιάζει η έρευνα της εξελικτικής βιολογίας.

Ωστόσο, διαφορετικές προσεγγίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε διαφωνίες με ευρύτερες επιπτώσεις. Δύο πρόσωπα με μείζονα συμβολή στην εξελικτική σκέψη είναι οι επιστήμονες του Χάρβαρντ Richard Lewontin και Edward O. Wilson. Και οι δύο έχουν εργαστεί ως επιστήμονες, αν κι έχουν επίσης συνεισφέρει στη φιλοσοφία και τη δημόσια κατανόηση της βιολογίας. Ο Lewontin ασχολήθηκε για χρόνια με τη γενετική πλη-

16 Οι ρυθμιστικές είναι αλληλουχίες DNA που δεν μεταγράφονται σε mRNA όπως οι κωδικές αλληλουχίες πρωτεϊνών, αλλά επηρεάζουν την έκφρασή τους. Αυτό συμβαίνει επειδή συγκεκριμένα μόρια, όπως οι μεταγραφικοί παράγοντες, μπορούν να συνδεθούν με ρυθμιστικές αλληλουχίες και να επηρεάσουν τη μεταγραφή κωδικών αλληλουχιών. Με άλλα λόγια, οι ρυθμιστικές αλληλουχίες δρουν ως διακόπτες που ρυθμίζουν τη μεταγραφή των κωδικών αλληλουχιών και τελικά τη σύνθεση των πρωτεϊνών (βλ. Carroll, 2005a· Stern, 2011, για λεπτομέρειες).

θυσμών, έχοντας ως αντικείμενό του την *Drosophila* καθώς και τους ανθρώπους. Κατασκεύασε μαθηματικά μοντέλα, μελέτησε τη γενετική ποικιλομορφία και υποστήριξε ότι υπάρχει μια διαλεκτική σχέση ανάμεσα στους οργανισμούς και το περιβάλλον τους. Ο Wilson ήταν περισσότερο αυτό που θα λέγαμε φυσιοδίφης, και επικεντρώθηκε στα κοινωνικά έντομα μελετώντας τα ως επί το πλείστον στα φυσικά τους περιβάλλοντα. Ο Lewontin ήταν επικεντρωμένος στη γενετική σύσταση των πληθυσμών, ενώ ο Wilson στην κοινωνική συμπεριφορά των μελών τους. Επομένως, χρησιμοποίησαν διαφορετικές ερευνητικές στρατηγικές, θέτοντας ο καθένας συγκεκριμένα ερωτήματα, και τελικά μελέτησαν την εξέλιξη από διαφορετική σκοπιά. Μολαταύτα, τα συμπεράσματά τους συνέβαλαν στο ίδιο γενικό πλαίσιο. Ωστόσο, οι Wilson και Lewontin διαφώνησαν πλήρως ως προς τις φιλοσοφικές επιπτώσεις των επιστημονικών τους συμπερασμάτων. Ο Wilson είναι πολύ γνωστός για την *Κοινωνιοβιολογία* του (1975), όπου υποστήριξε τη γενετική βάση της (ανθρώπινης) συμπεριφοράς. Ο Lewontin ήταν μεταξύ των δριμύτερων επικριτών του, ως από κοινού συγγραφέας του βιβλίου *Not in Our Genes* (1984), καθώς και άλλων βιβλίων που προσφέρουν αντεπιχειρήματα (για μια σύντομη και κατατοπιστική περιγραφή αυτών των διαφορών, βλ. Ruse, 1999, σ. 153-193).

Τα προαναφερθέντα παραδείγματα δείχνουν την ποικιλία των ερωτημάτων που τίθενται από τους εξελικτικούς βιολόγους: για τη γενετική δομή των πληθυσμών, τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις των μελών τους, την εμφάνιση νέων ειδών, την εξέλιξη των ζωικών μορφών και πολλά άλλα. Ας δούμε τώρα πώς μπορούν να αντιμετωπιστούν τέτοια ερωτήματα. Επιστρέφοντας στα σκαθάρια του προηγούμενου παραδείγματος, ας υποθέσουμε ότι ένας εξελικτικός βιολόγος που διεξάγει έρευνα πεδίου παρατηρεί τα ακόλουθα: ένας πληθυσμός από πράσινα σκαθάρια ζει σε χορτολίβαδο και το χρώμα τους διευκολύνει την απόκρυψή τους στο συγκεκριμένο περιβάλλον· ένας πληθυσμός από καφέ σκαθάρια ζει σ' ένα γειτονικό, απομονωμένο πετρώδες μέρος όπου το καφέ είναι το κυρίαρχο χρώμα κι όπου το χρώμα των σκαθαριών επίσης διευκολύνει την απόκρυψή τους. Ας υποθέσουμε ότι τα σκαθάρια δεν διαφέρουν σε κανέναν μορφολογικό χαρακτήρα (π.χ., στο σχήμα ή το μέγεθος) (Εικόνα 1.7).

Δύο ερωτήματα που θα ενδιέφεραν έναν εξελικτικό βιολόγο ο οποίος μελετά αυτούς τους πληθυσμούς είναι τα εξής: πρόκειται για δύο διακριτά είδη ή για δύο πληθυσμούς του ίδιου είδους; Αν πρόκειται για δύο διακριτά είδη, πότε και πώς απέκλιναν από τον κοινό πρόγονό τους; Για ν' απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα, ο βιολόγος μπορεί να κάνει υποθέσεις και να τις ελέγξει αντιπαραβάλλοντάς τες με τις ενδείξεις. Αυτό είναι χαρακτηριστικό του τρόπου με τον οποίο δουλεύουν οι επιστήμονες. Για να

απαντηθούν συγκεκριμένα ερωτήματα, οι επιστήμονες μπορούν να κατασκευάζουν υποθέσεις και να αναζητούν ενδείξεις είτε για να τις υποστηρίξουν είτε για να τις απορρίψουν.<sup>17</sup> Αλλά αυτό δεν σημαίνει πως κάποιος επιστήμονας δεν μπορεί να εργαστεί αν δεν έχει μια υπόθεση κατά νου. Απεναντίας, οι επιστήμονες μπορούν να διατυπώνουν ερευνητικά ερωτήματα και κατόπιν να αναζητούν ενδείξεις ώστε να δοθούν απαντήσεις σε τούτα τα ερωτήματα. Ωστόσο, συχνά έχουν προσδοκώμενα αποτελέσματα στον νου τους, και έτσι μπορεί να κατασκευάζουν υποθέσεις βασισμένες σ' αυτά. Στην αντίθετη περίπτωση, απλώς διατυπώνουν ερευνητικά ερωτήματα βασισμένα σε υπάρχοντα δεδομένα, γνώσεις ή έννοιες. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι επιστήμονες δεν αρχίζουν μια έρευνα εκ του μηδενός· αναζητούν πάντοτε απαντήσεις βασισμένες σε προηγούμενες επιστημονικές γνώσεις και θεωρίες. Αυτές λαμβάνονται υπόψη και αποτελούν τη βάση για την κατασκευή συγκεκριμένων ερευνητικών ερωτημάτων ή υποθέσεων, στα οποία προσπαθούν να απαντήσουν ή να τα ελέγξουν βάσει των εμπειρικών ενδείξεων.<sup>18</sup> Φυσικά, ανάλογα με τον κλάδο, μπορεί να υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις ή συνδυασμοί προσεγγίσεων. Μολαταύτα, θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε τη διαδικασία της απάντησης σ' ένα επιστημονικό ερώτημα με το ακόλουθο διάγραμμα:

---

ερώτημα → (υπόθεση →) εμπειρικά δεδομένα → αποτελέσματα → συμπεράσματα

---

Ας υποθέσουμε ότι για να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα ο εξελικτικός βιολόγος κατασκευάζει μία υπόθεση για το καθένα. Αυτά είναι δύο διαφορετικά είδη ερωτημάτων, που απαιτούν δύο διακριτά είδη υποθέσεων. Το αν οι δύο πληθυσμοί ανήκουν ή όχι στο ίδιο είδος, είναι ένα τωρινό ερώτημα που μπορεί να απαντηθεί άμεσα. Δεδομένης της μορφολογίας τους, ο εξελικτικός βιολόγος θα μπορούσε αρχικά να κάνει την υπόθεση πως πρόκειται για δύο διακριτά αλλά στενά συγγενικά είδη. Ύστερα, θα μπορούσε να εξετάσει τη μορφολογία τους σε επίπεδο μεγα-

---

17 Αυτός ο συγκεκριμένος –και ιδιόμορφος για κάποιους– τρόπος εργασίας είναι συμβατικά αλλά εσφαλμένα γνωστός ως η «επιστημονική μέθοδος». Αυτός ο όρος είναι παραπλανητικός επειδή δεν υπάρχει μία και μοναδική μέθοδος που να χρησιμοποιείται απ' όλους τους επιστήμονες. Ωστόσο, υπάρχουν συγκεκριμένοι τρόποι σκέψης και στρατηγικές έρευνας, που είναι πολύ κοινοί, -ές.

18 Οι επιστήμονες μπορεί να θέτουν ερωτήματα ή να κατασκευάζουν υποθέσεις. Στη δεύτερη περίπτωση, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν βρίσκουν πάντοτε κάτι που να τις στηρίζει. Ωστόσο, ακόμα και οι υποθέσεις που έχουν απορριφθεί, μπορεί να οδηγήσουν σε έγκυρα επιστημονικά συμπεράσματα ή ακόμα και ν' ανοίξουν νέα πεδία έρευνας παρακινώντας τους επιστήμονες να θέσουν νέα ερωτήματα.

λύτερων λεπτομερειών. Θα μπορούσε επίσης να τα παρατηρήσει για κάποιο διάστημα στα φυσικά τους ενδιατήματα ώστε να δει πώς συμπεριφέρονται, ζευγαρώνουν, τρέφονται και αλληλεπιδρούν. Έπειτα, θα μπορούσαν να μεταφερθούν στο εργαστήριο για μια πιο λεπτομερή εξέταση της ανατομίας, της φυσιολογίας και της συμπεριφοράς τους. Εκεί θα μπορούσαν επίσης να εξεταστούν γενετικά και να συγκριθούν αναμεταξύ τους ως προς τις αλληλουχίες του DNA τους.<sup>19</sup> Αυτά τα μορφολογικά και μοριακά δεδομένα θα ήταν κατά πάσα πιθανότητα επαρκή για να συμπεράνουμε αν οι δύο πληθυσμοί ανήκουν ή όχι στο ίδιο είδος.

Υποθέτοντας ότι τα ευρήματα υποστηρίζουν την αρχική υπόθεση, ότι πρόκειται για δύο στενά συγγενικά είδη σκαθαριού, ο εξελικτικός βιολόγος θα μπορούσε να κάνει μια άλλη υπόθεση, για το πώς εξελίχθηκαν από τον πιο πρόσφατο κοινό πρόγονό τους. Όμως αυτό είναι άλλου είδους ερώτημα, όχι σημερινό αλλά ιστορικό, και δεν μπορεί να απαντηθεί με τρόπο άμεσο, αλλά μόνον έμμεσο. Ο εξελικτικός βιολόγος μπορεί μονάχα να κάνει μια ιστορική υπόθεση για το πώς τα δύο είδη θα μπορούσαν να είχαν εξελιχθεί από έναν κοινό πρόγονο, και να την ελέγξει. Αυτό δεν είναι ούτε απλό ούτε εύκολο. Ας υποθέσουμε ότι από τα μορφολογικά και τα μοριακά δεδομένα, καθώς κι από τις συγκρίσεις με άλλα υπάρχοντα είδη σκαθαριού, βγαίνει το συμπέρασμα ότι το «πράσινο» είδος εξελίχθηκε από έναν ιδρυτικό πληθυσμό που μετανάστευσε στη χλωώδη περιοχή από την πετρώδη. Σύμφωνα μ' αυτό, πρέπει να υπήρξε κάποια χρωματική ποικιλότητα μέσα στον αρχικό πληθυσμό: η πλειονότητα των σκαθαριών ίσως να ήταν καφέ, αλλά κάποια πράσινα (ή πρασινωπά) μπορεί να υπήρχαν επίσης. Από έναν αρχικό πληθυσμό αποτελούμενο από σκαθάρια που ζούσαν στην πετρώδη περιοχή, ένα μικρό μέρος θα μπορούσε να 'χε μεταναστεύσει στη χλωώδη περιοχή. Και οι δύο πληθυσμοί ίσως να αποτελούνταν και από καφέ και από πράσινα (ή πρασινωπά) σκαθάρια. Ωστόσο, σε κάθε περιοχή, μόνον εκείνα τα σκαθάρια που μπορούσαν να εξασφαλίσουν απόκριψη θα ήταν σε θέση, μακροπρόθεσμα, να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν· έτσι, ύστερα από πολύ καιρό τούτοι οι πληθυσμοί ίσως να εξελίχθηκαν, ούτως ώστε μόνο καφέ σκαθάρια να είχαν επιβιώσει και αναπαραχθεί στην πετρώδη περιοχή, και μονάχα πράσινα να είχαν επιβιώσει και αναπαραχθεί στη χλωώδη περιοχή. Αυτοί οι πληθυσμοί σκαθαριών αρχικά διέφεραν μόνο στο χρώμα, αλλά, με το να είναι απομονωμένοι ο ένας απ' τον άλλον για πολύ καιρό, τελικά εξελίχθηκαν με διαφο-

19 Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι μελέτης, στην πραγματικότητα είναι πιο πολύπλοκοι απ' ό,τι περιγράφεται εδώ, και συνήθως απαιτούν πολλούς επιστήμονες, ειδήμονες σε διαφορετικά πεδία, ώστε να διεξαχθούν.



ρετικό τρόπο, καθώς οι όποιοι νέοι χαρακτήρες περιορίζονταν στον πληθυσμό όπου εμφανίζονταν, εξαιτίας της μεταξύ τους απομόνωσης. Έτσι, οι δύο αρχικοί υποπληθυσμοί του ίδιου είδους τελικά εξελίχθηκαν σε δύο διακριτά είδη (βλ. Εικόνα 1.8).<sup>20</sup>

Πώς μπορεί μια τέτοια υπόθεση να στηριχθεί περαιτέρω ή τελικά να απορριφθεί; Υπάρχουν διάφοροι τρόποι. Ο εξελικτικός βιολόγος θα μπορούσε να αναζητήσει άλλους πληθυσμούς σκαθαριών που διαβιούν στην περιοχή. Εκεί, ίσως να έβρισκε άλλα σκαθάρια που θα διαβιούσαν ανάμεσα στο «καφέ» και το «πράσινο» είδος και θα εμφάνιζαν ενδιάμεσα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Ή μπορεί να έβρισκε τέτοιες ενδιάμεσες μορφές σ' απολιθώματα εξαφανισμένων ειδών σκαθαριού. Οι μοριακές συγκριτικές αναλύσεις DNA του «πράσινου» και του «καφέ» είδους, καθώς και άλλων ειδών που διαβιούν στην περιοχή, θα μπορούσαν επίσης να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες. Όλα αυτά ίσως βοηθούσαν στο να στηριχτεί ή να απορριφθεί η ιστορική υπόθεση. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι τέτοιες ιστορικές υποθέσεις μπορεί να απορριφθούν πιο εύκολα απ' ό,τι να στηριχτούν. Αν ένα σύνολο ενδείξεων διέψευδε κατηγορηματικά την υπόθεση (π.χ., σκαθάρια που διαβιούσαν στην ενδιάμεση περιοχή δεν εμφάνιζαν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά αλλά ήταν πολύ διαφορετικά από το «πράσινο» και το «καφέ» είδος), τότε ο εξελικτικός βιολόγος θα μπορούσε να την απορρίψει και να προβεί σε μια νέα. Από την άλλη, αν όλες οι συλλεγμένες ενδείξεις στήριζαν την υπόθεσή του, θα τη δεχόταν ως την πλέον πιθανή, όμως το ζήτημα δεν θα έληγε εκεί. Είναι πάντα πιθανό να προκύψουν νέες ενδείξεις που μπορεί να καταρρίψουν ακόμα και μια καλά εδραιωμένη υπόθεση· η ιστορία της επιστήμης βρίθει από τέτοια επεισόδια (για πολλά παραδείγματα, βλ. Bowler & Morus, 2005).

Όπως και συνολικά η επιστήμη, η εξελικτική βιολογία δεν προσφέρει οριστικές απαντήσεις. Οι εξελικτικοί βιολόγοι συνήθως βασίζονται στα συμπεράσματά τους σ' ό,τι αποκαλείται *συναγωγή στη βέλτιστη εξήγηση* (ΣΒΕ). Αυτό σημαίνει ότι βασιζόμενοι σε οποιοσδήποτε διαθέσιμες ενδείξεις κατασκευάζουν εξηγήσεις που εξηγούν αυτές τις ενδείξεις με τον καλύτερο δυνατό τρόπο (για λεπτομέρειες σχετικά με τη ΣΒΕ, βλ. Κεφάλαιο 6). Αυτό που κάνουν στην πραγματικότητα είναι να συγκρίνουν δυνητικές, συχνά αντικρουόμενες, εξηγήσεις και τελικά να αποδέχονται

---

20 Πρόκειται για ένα πολύ απλό, ίσως και υπεραπλουστευμένο σενάριο. Το χρησιμοποιώ μονάχα για εξηγητικούς σκοπούς, ώστε να δείξω τη διαφορά ανάμεσα στην απάντηση ερωτημάτων σχετικά με το παρόν (ανήκουν οι δύο πληθυσμοί στο ίδιο είδος ή σε διαφορετικά;) και με το παρελθόν (πώς εξελίχθηκαν αυτά τα δύο διαφορετικά είδη;).

εκείνη που ταιριάζει καλύτερα με τις διαθέσιμες ενδείξεις. Φυσικά, συν τω χρόνω, οι ενδείξεις μπορεί ν' αλλάξουν ή να προκύψουν νέες εξηγήσεις καθώς νέες ενδείξεις γίνονται διαθέσιμες. Αλλά υπάρχουν τουλάχιστον δύο διακριτά μέρη των εξελικτικών εξηγήσεων τα οποία δεν θα αλλάξουν ποτέ. Οι χαρακτήρες και οι ιδιότητες αυτών των δύο ειδών σκαθαριού είτε προέρχονται από τον κοινό πρόγονό τους είτε είναι αποτέλεσμα της εξέλιξης τους στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Κοινοί χαρακτήρες προερχόμενοι από έναν κοινό πρόγονο αποκαλούνται ομολογίες. Ωστόσο, διαφορετικά είδη μπορεί να εμφανίζουν κοινούς χαρακτήρες που έχουν επιλεγεί υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες· τούτοι οι χαρακτήρες ονομάζονται ομοπλασίες (βλ. Κεφάλαιο 5). Τέλος, συγκεκριμένοι χαρακτήρες που έχουν εξαπλωθεί στον πληθυσμό σ' ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, ως επί το πλείστον μέσω της φυσικής επιλογής, και δίνουν ένα πλεονέκτημα στους κατόχους τους συνήθως αποκαλούνται προσαρμογές (βλ. Κεφάλαιο 6). Η κοινή καταγωγή και η εξέλιξη των πληθυσμών μέσω της αλληλεπίδρασής τους με το περιβάλλον τους μπορούν να εξηγήσουν επαρκώς την προέλευση των βιολογικών χαρακτήρων και είναι θεμελιώδεις έννοιες σε οποιοδήποτε ερώτημα απαντάται από την εξελικτική βιολογία.

Επομένως, οι εξελικτικοί βιολόγοι μπορεί να έχουν διάφορους εξηγητικούς στόχους, αλλά όλοι βασίζονται σε ενδείξεις και σε κάποιες θεμελιώδεις ιδέες όπως η κοινή καταγωγή και η εξέλιξη μέσω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, ώστε να βγάλουν τα συμπεράσματά τους. Το γιατί μπορεί να καταλήγουν σε διαφορετικά συμπεράσματα είναι άλλη ιστορία. Αυτό εξαρτάται από τους εξηγητικούς τους στόχους, τα ερωτήματα που τίθενται και τα δεδομένα που αποκτώνται. Επίσης, εξαρτάται από τη σκοπιά που βλέπουν οι επιστήμονες τα πράγματα. Παρ' όλα αυτά, η εξελικτική βιολογία μπορεί όντως να προσφέρει απαντήσεις σε πολλά άλλα ερωτήματα που δεν τίθενται απαραίτητως από εξελικτικούς βιολόγους, αλλά από άλλους επιστήμονες. Πιο ενδιαφέρον ακόμα είναι το ότι κάποια απ' αυτά τα ερωτήματα έχουν άμεσο αντίκτυπο στην ανθρώπινη ζωή. Σε τούτα τα ερωτήματα θα στραφούμε τώρα. Στα επόμενα δύο υποκεφάλαια εξετάζω, ως δύο περιπτωσιολογικές μελέτες, την οικοσιτοποίηση και τα επιδημικά λοιμώδη νοσήματα.<sup>21</sup>

21 Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σ' αυτό το κεφάλαιο παραθέτω μερικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα και επικεντρώνομαι σε εξελικτικούς μηχανισμούς. Ο Mindell (2007) είναι έξοχη πηγή παραδειγμάτων εξέλιξης στην καθημερινή ζωή, κι ο Poianni (2012) είναι επίσης έξοχη πηγή σχετικά με εφαρμογές της εξελικτικής θεωρίας.