

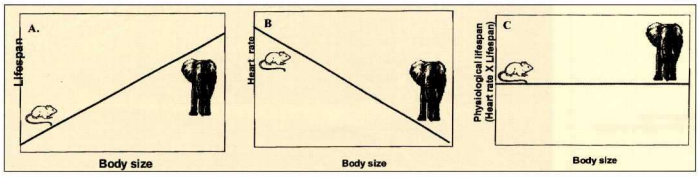
Η ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΖΩΩΝ: ΠΩΣ ΤΑ ΖΩΑ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΥΝ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΚΑΙ ΤΟ ΧΩΡΟ

Penny S. Reynolds

Επίκουρος Καθηγήτρια Βιολογίας,
Τμήμα Βιολογίας Πανεπιστημίου του Richmond, Virginia

Η πρόσφατη ιστορία του ανθρώπου δείχνει διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις πάνω στον χρόνο που διαθέτουμε και ο τρόπος ζωής μας είναι ταχύτερος και περισσότερο αστικός. Εξαρτώμαστε από πολύπλοκα μηχανήματα χρονομέτρησης για να ελέγχουμε τα προγράμματά μας – ρολόγια, ψηφιακά χρονόμετρα, υπολογιστές χειρός και άλλα παρόμοια. Μας είναι αδύνατο να φανταστούμε για ποιο λόγο τα ζώα θα χρειάζονταν ένα βιολογικό αντίστοιχο του ρολογιού. Ωστόσο, όλα τα ζωντανά πλάσματα (συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων που ζουν στις πόλεις) είναι προσαρμοσμένα να ζουν πάνω σ' έναν περιστρεφόμενο πλανήτη, ο οποίος ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από έναν αστέρα. Για τον λόγο αυτό, οι ημερήσιες και οι εποχιακές δραστηριότητες των ζώων συνδέονται στενά με τους ημερήσιους και εποχιακούς ρυθμούς του φυσικού κόσμου. Επιπλέον, οι πρόσφατες πρόοδοι στη μοριακή βιολογία έχουν δώσει τη δυνατότητα στους ερευνητές να εντοπίσουν τα ειδικά γονίδια των οποίων η λειτουργία ρυθμίζει τους βιολογικούς ρυθμούς που παρατηρούμε στα ζώα. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι πολύ παρόμοιοι γενετικοί μηχανισμοί φυσιολογικής χρονομέτρησης έχουν διαπιστωθεί σε πολύ διαφορετικά είδη, όπως τα κυανοβακτήρια, η μούχλα του κόκκινου ψωμιού, οι φρουτόμυγες, τα χάμστερ και τα διαγονιδιακά (transgenic) ποντίκια. Το γεγονός ότι μια τόσο ευρεία ποικιλία μορφών ζωής διαθέτει παρόμοιους μηχανισμούς χρονομέτρησης είναι εκ πρώτης όψεως παράδοξο και παρουσιάζει, προφανώς, ενδιαφέρον για τους βιολόγους. Ωστόσο, αυτός ο βιολογικός συντηρητισμός δεν είναι απλώς κάτι πρωτόγνωρο, αλλά έχει επίσης τεράστια πρακτική σημασία για τους ερευνητές. Επειδή αυτοί οι λιγότερο πολύπλοκοι οργανισμοί έχουν σχετικά απλά και επαρκώς κατανοητά γονιδιώματα, μπορούν για τον λόγο αυτό να χρησιμοποιηθούν ως μοντέλα για την κατανόηση της μοριακής βάσης της βιολογικής χρονομέτρησης στα πιο πολύπλοκα ζώα, όπως είναι ο άνθρωπος.

Σχέση ανάμεσα σε:
α) διάρκεια ζωής,
β) συχνότητα καρδιακών σφυγμών και γ) φυσιολογική ζωή και μέγεθος σώματος στα θηλαστικά. Η διάρκεια της ζωής έχει ανάλογη σχέση προς το μέγεθος, ενώ η συχνότητα των καρδιακών σφυγμών (μαζί με τις περισσότερες βιολογικές συχνότητες) έχει αντίστροφη σχέση προς το μέγεθος. Επομένως, ο συνολικός αριθμός καρδιακών σφυγμών είναι κατά προσέγγιση ο ίδιος στη διάρκεια της ζωής του κάθε ζώου.



Τα ζώα λειτουργούν σε δύο χρονικές κλίμακες: του φυσιολογικού χρόνου και του απόλυτου χρόνου. Οι φυσιολογικοί ρυθμοί έχουν καιρική σημασία για όλες τις μορφές ζωής. Κάποιοι ρυθμοί, όπως οι σφυγμοί της καρδιάς και η αναπνοή, αρχίζουν πριν από τη γέννηση και συνεχίζουν χωρίς διακοπή μέχρι το θάνατο – ακόμη και μια σύντομη διαταραχή των ρυθμών αυτών είναι ικανή να σκοτώσει το άτομο. Άλλοι ρυθμοί βρίσκονται κάτω από τον μερικό έλεγχο του ατόμου και μπορεί ακόμη και να χρειάζονται ηθελμημένη έναρξη. Στους ρυθμούς αυτούς περιλαμβάνονται η δραστηριότητα, ο ύπνος και η τροφή. Τα φυσικά επίπεδα πολλών φυσιολογικών χαρακτηριστικών –για παράδειγμα, του μεταβολισμού, της πυκνότητας των ορμονών στο αίμα, της θερμοκρασίας του σώματος, της απορρόφησης, των εκκρίσεων και των βαθμών πλήρωσης της ουροδόχου κύστης– παρουσιάζουν διακυμάνσεις, ανάλογα με τις αλλαγές στη δραστηριότητα, την ανάπαυση και τη λήψη τροφής, αλλά παρουσιάζουν επίσης μια σταθερή ημερήσια περιοδικότητα, χωρίς να ανταλλάσσονται το άτομο αυτές τις μεταβολές. Πιο πρόσφατα, έχει διαπιστωθεί ότι τα συμπτώματα ορισμένων ασθενειών παρουσιάζουν επίσης μια σταθερή ρυθμικότητα. Όπως αναλύεται παρακάτω, αυτές οι παρατηρήσεις είναι σημαντικές, τόσο για

τη διάγνωση όσο και για τη θεραπεία πολλών και ποικίλων ασθενειών.

Είναι αξιοπερίεργο το ότι ένας από τους βασικούς καθοριστικούς παράγοντες των χρονικών κλιμακίων των ζώων είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος του σώματος κάθε είδους. Πολλά φυσιολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά ποικίλουν με προβλέψιμο τρόπο, ανάλογα με το μέγεθος του σώματος, και οι διαδικασίες που εξαρτώνται από τον χρόνο δεν αποτελούν εξαίρεση. Τα μεγάλα ζώα ζουν με πολύ αργότερους ρυθμούς από ό,τι τα μικρά: η καρδιά τους χτυπά πιο αργά, αναπνέουν πιο αργά, περπατούν πιο αργά και κινούνται λιγότερο γρήγορα από ό,τι τα μικρά ζώα. Επειδή όμως η συχνότητα είναι μέγεθος αντίστροφο προς το χρόνο (συχνότητα = 1/χρόνος), είναι αναμενόμενο ο ταχύτερος ρυθμός ζωής να δίνει συντομότερο μέσο όρο ζωής από τον βραδύτερο ρυθμό. Πράγματι, όπως είναι επόμενο, τα μικρά ζώα ζουν για πολύ συντομότερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα. Ένα κατοικίδιο ποντίκι μπορεί να ζήσει 1 με 2 χρόνια, ένα σκυλί ή μια γάτα γύρω στα 10 χρόνια, ενώ ένας ελέφαντας περίπου 50 χρόνια. Έτσι, παρόλο που οι φυσιολογικοί χρόνοι μπορεί να είναι ισοδύναμοι, ο χρονολογικός χρόνος έχει πολύ διαφορετική σημασία για ζώα με διαφορετικό μέγεθος. Για παράδειγμα, η



καρδιά του ελέφαντα χτυπά περίπου 20 φορές το λεπτό, ενώ η καρδιά του ποντικίου χτυπά γύρω στις 600 φορές το λεπτό. Όμως στη συνολική διάρκεια της ζωής αυτών των διαφορετικών ζώων η καρδιά του καθενός εκτελεί περίπου τον ίδιο αριθμό χτύπων. Με άλ-



Μαυροπούλα με φθνοπαρινό πτέρωμα.



Ο απόλυτος χρόνος λειτουργεί με βάση τρεις φυσικούς κύκλους: την *ηλιακή ημέρα*, που καθορίζεται από την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της, τον *σεληνιακό μήνα*, που καθορίζεται από την περιστροφή της σελήνης γύρω από τη γη, και το *έτος*, που καθορίζεται από την περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο. (Παρά το βάσανο που είναι οι Δευτέρες για μας τους ανθρώπους, η εβδομάδα, στην πραγματικότητα, δεν αντιστοιχεί σε κανένα φυσικό κύκλο. Αντίθετα, είναι μια αυθαίρετη κατανομή ημερών σε ομάδες από επτά.)

Οι ημερήσιοι ή εικοσιπτεράωροι κύκλοι είναι οι πιο γνωστοί από τους φυσικούς εξωτερικούς κύκλους. Ο κύκλος ύπνου-εγρήγορασης είναι το πιο προφανές παράδειγμα εικοσιπτεράωρου ρυθμού, όμως πολλές φυσιολογικές διαδικασίες, όπως η θερμοκρασία του σώματος και τα επίπεδα μεταβολισμού, παρουσιάζουν επίσης ρυθμικές ημερήσιες αυξομειώσεις. Ο σεληνιακός κύκλος αντιστοιχεί σε μια περίοδο περίπου 29,5 ημερών.

Επειδή η ένταση του φωτός ποικίλλει ανάλογα με τη φάση της σελήνης, ο σεληνιακός κύκλος επηρεάζει τους ρυθμούς δραστηριότητας πολλών νυκτόβιων ζώων. Επειδή η σελήνη επηρεάζει τις παλίρροιας των ωκεανών και το εύρος των παλίρροιαν ποικίλλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις της γης, της σελήνης και του ήλιου, ο σεληνιακός κύκλος έχει τη μεγαλύτερη επίδρασή του πάνω στα υδρόβια και τα διαπαλιρροιακά ζώα. Ωστόσο, σεληνιακοί κύκλοι εμφανίζονται και στα ημερόβια ζώα της ξηράς. Ένα γνωστό παράδειγμα είναι η ωορρηξία και ο εμμηνορροϊκός κύκλος των γυναικών. Η ωορρηξία συνήθως συμβαίνει κατά τη διάρκεια των σκοτεινών φάσεων της σελήνης.

Πολλά ζώα με μακρά διάρκεια ζωής χρειάζονται να συντονίσουν τις δραστηριότητές τους με βάση τις εποχές που εναλλάσσονται στη διάρκεια του έτους. Η σημαντικότερη ένδειξη για τους *ετήσιους ρυθμούς* φαίνεται ότι είναι οι αλλαγές στη σχετική διάρκεια της φωτεινής και της σκοτεινής περιόδου ή *φωτοπεριόδου*.

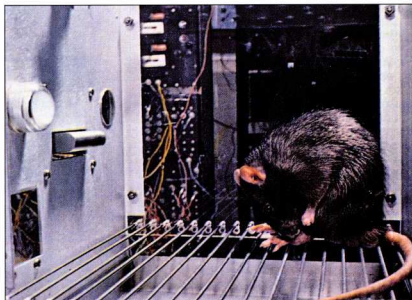
Λεοσφόραλη
πρωτό καταβροχχίσει
το θράσμα της.

λα λόγια, κάθε ζωή αποτελείται από τον ίδιο περίπου αριθμό φυσιολογικών ενεργειών. Τα ζώα εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες σε χρόνο που εξαρτάται από το μέγεθός τους και όχι από τον απόλυτο χρόνο. Η φυσική διάρκεια ζωής των κατοικιδίων μας ποτέ δεν θα φτάσει τη διάρκεια ζωής του ανθρώπου ιδιοκτήτη τους σε απόλυτο χρόνο, αλλά τα 2 χρόνια ζωής ενός ποντικιού και τα 10 χρόνια ενός σκύλου μπορούν να θεωρηθούν το αντίστοιχο φυσιολογικό διάστημα της ζωής ενός ογδοντάχρονου ανθρώπου.

Όμως οι φυσιολογικοί ρυθμοί δεν είναι αποκλειστική ιδιότητα του κάθε συγκεκριμένου ζώου, ούτε είναι αποκομμένοι από την υπόλοιπη φύση. Οι ρυθμοί αυτοί πρέπει να λειτουργούν στο πλαίσιο των απαιτήσεων του εξωτερικού, ή απόλυτου, χρόνου. Για τον λόγο αυτό, τα ζώα χρειάζονται ένα ρολόι για να ρυθμίζουν τους φυσιολογικούς ρυθμούς τους και να τους συντονίζουν με τους ρυθμούς του εξωτερικού κόσμου.



Στρουθοκάμηλοι
που τρέχουν:
βραχογραφία της Σαχάρας,
περίπου 10.000 π.Χ.



Η σπουδαιότερη δραστηριότητα των ζώων, που απαιτεί ακριβείς ετήσιους κύκλους, είναι η αναπαραγωγή. Στις εύκρατες περιοχές, όπου το κλίμα παρουσιάζει έντονες εποχιακές διακυμάνσεις, τα ζώα έχουν ανάγκη να συγχρονίζουν την αναπαραγωγή τους με τις συνθήκες που είναι οι πιο ευνοϊκές για την επαρκή διατροφή των γόνων και την επιβίωσή τους. Για τον λόγο αυτό, η κύρια εποχή αναπαραγωγής είναι οι αρχές της άνοιξης. Σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις αποτελούν περιοριστικό παράγοντα, η αναπαραγωγή έχει προσαρμοσθεί ώστε να γίνεται αμέσως μετά την εποχή των βροχών, οπότε υπάρχει αφθονία τροφής. Για παράδειγμα, στο καταψύγιο Σερενγκέτι (Τανζανία) τα μεγάλα χορτοφάγα θηλαστικά, όπως η ζέβρα και η αντιλόπη γκνου, γεννούν τα μικρά τους κατά κανόνα τον Ιανουάριο, αμέσως μόλις αρχίζουν οι βροχές. Η εποχή του ζευγαρώματος είναι κάπως αργότερα, τον Μάιο και τον Ιούνιο, αμέσως μετά το τέλος των βροχοπτώσεων. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα αρσενικά βρίσκονται σε άριστη κατάσταση την εποχή που χρειάζεται να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του οίστρου, ενώ τα θηλυκά έχουν τη δυνατότητα να επανέλθουν σε καλή κατάσταση μετά τη γέννηση και το θηλασμό των γόνων τους.

Η χειμέρια νάρκη εμφανίζεται επίσης με ετήσιο ρυθμό. Όπως εμείς ρυθμίζουμε τον θερμοστάτη, ώστε να μειώσουμε το κόστος της θέρμανσης του σπιτιού μας, με πολύ παρόμοιο τρόπο τα ζώα που πέφτουν σε χειμέρια νάρκη ρυθμίζουν τη θερμοκρασία του σώματός τους σε χαμηλά επίπεδα για ολόκληρες εβδομάδες ή και μήνες κάθε φορά. Έτσι, η χειμέρια νάρκη είναι μια στρατηγική που χρησιμοποιούν μερικά ζώα για να ελαχιστοποιούν την καταναλωμένη ενέργεια σε περιόδους έντονου κρύου και έλλειψης τροφής, όπως συμβαίνει στη διάρκεια του χειμώνα. Ο ετήσιος ρυθμός συνοδεύεται από διαφοροποιήσεις στην πάχυνση (πολλά ζώα που πέφτουν σε χειμέρια νάρκη παχαιίνουν εξαιρετικά πολύ προτού "κλείσουν το διακόπτη" για το χειμώνα) και από ένα διάστημα αναπαραγωγικής δραστηριότητας ακριβώς πριν ή κατά τη διάρκεια της περιόδου της εξόδου από τη νάρκη κατά το καλοκαίρι. Αυτές οι μεταβολές στη φυσιολογία βασίζονται επίσης σε συστήματα εσωτερικών ρολογιών. Για πολλά είδη το έναυσμα είναι η αλλαγή στη φωτοπερίοδο*.

Καθώς οι μέρες γίνονται μικρότερες το φθινόπωρο, τα ζώα που περνούν περίοδο χειμέριας νάρκης αρχίζουν να παχαιίνουν, και ακόμη αρχίζει να πέφτει η θερμοκρασία του σώματός τους.

Μια άλλη προσαρμογή στις εποχιακές αλλαγές του κλίματος είναι η αποδημία. Πολλά ζώα μετακινούνται σε κάποια απόσταση, προς περιβάλλοντα πιο ευνοϊκά, ανάλογα με τις εποχιακές αλλαγές του περιβάλλοντος. Για τη ρύθμιση και τον συντονισμό του χρόνου αποδημίας χρειάζονται κάποιο ρολόι. Για παράδειγμα, πολλά υδρόβια ασπόνδυλα, ψάρια, βάτραχοι και χελώνες μετακινούνται στα βαθύτερα νερά των λι-

* Φωτοπερίοδος, στη Βιολογία, είναι η διάρκεια της έκθεσης ενός οργανισμού στο ηλιακό φως ανά εκκοιτητήριο. Η ημερήσια διάρκεια του φωτός ενοηθεί την άριστη λειτουργία του οργανισμού. (Πα-λα-Μητρ. Σημ. Συντ.)

μινών και των ρευμάτων όσο οι ημέρες γίνονται μικρότερες και επικρατεί ο ψυχρότερος καιρός. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, πολλά ζώα μεταναστεύουν σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις, προς νέους βιοτόπους ή ακόμη και προς άλλες ηπείρους. Τα πουλιά είναι τα πιο θεαματικά και γνωστά αποδημητικά ζώα. Πολλά είδη πουλιών διανύουν πετώντας την απόσταση ανάμεσα σε δύο ημισφαίρια δύο φορές τον χρόνο. Πολλά είδη της ευκρατής ζώνης της Βόρειας Αμερικής διαχειμάζουν στις νεοτροπικές περιοχές του Μεξικού και της Νότιας Αμερικής. Στην Ευρώπη αρκετές εκατοντάδες είδη πουλιών μεταναστεύουν νότια, προς την Αφρική και τη νοτιοανατολική Ασία. Στον υδρόβιο κόσμο, μεταναστεύσεις πραγματοποιούν ψάρια όπως ο σολομός και τα χέλια, καθώς και πολλά θαλάσσια θηλαστικά. Για πολλά ζώα οι αλλαγές στη φωτοπερίοδο αποτελούν το κύριο έναυσμα για τις φυσιολογικές και συμπεριφορικές αλλαγές που απαιτούνται, ώστε να καλυφθεί το ενεργειακό κόστος ενός τόσο μακρινού ταξιδιού. Οι πιο εντυπωσιακές αλλαγές παρουσιάζονται στα μικρά αποδημητικά πουλιά. Όσο οι μέρες μικραίνουν, τα πουλιά αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες λίπους, που θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο κατά τις μακρές πτήσεις τους, και εμφανίζουν αυξημένη δραστηριότητα (αποδημητική ανησυχία ή *Zugunruhe*) με κατεύθυνση προς τον νότο κατά τη φθινοπωρινή τους μετανάστευση και προς το βορρά κατά την επιστροφή τους την άνοιξη.

Τα αποδημητικά πουλιά χρειάζονται επίσης κάποιο ρολόι για τη ρύθμιση του ταξιδιού τους. Η πλοήγηση έχει βασική σημασία για κάθε ζώο που χρειάζεται να προσανατολιστεί με ακρίβεια στη διάρκεια ενός μακρού ταξιδιού. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη μιας "χαρτογραφικής αίσθησης" (αίσθηση του πού βρίσκεται κανείς) και μια "αίσθηση πυξίδας" (αίσθηση της κατεύθυνσης). Για την εξασφάλιση της ρύθμισης και της ακρίβειας τόσο του χρόνου όσο και του χώρου, απαιτούνται ένα ρολόι και μια πυξίδα. Πράγματι, *ρολόι και πυξίδα έχουν κοινό τους γνώρισμα ότι και τα δύο μαζί προσδιορίζουν τόσο τον χρόνο όσο και το χώρο, με βάση τις ουράνιες σχέσεις*. Η θέση του ήλιου δίνει την ένδειξη της γεωγραφικής πυξίδας, αλλά, επειδή ο ήλιος κινείται στη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τη γη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυξίδα μόνο αν είναι γνωστή η ώρα της ημέρας. Έτσι, στα ζώα ο έμφυτος εικοσιπεντάωρος ρυθμός τους λειτουργεί σαν χρονόμετρο, που αντισταθμίζει τις σχετικές κινήσεις ήλιου και γης.

Στη δεκαετία του 1950 πρώτος ο Gustav Kramer απέδειξε ότι τα ψαρόνια χρησιμοποιούν τον ήλιο ως πυξίδα κατά την αποδημία τους. Το 1960 ο Karl Hoffman έδειξε ότι, αν επαναρρυθμιστεί η ένδειξη του εικοσιπεντάωρου ρολογιού των πουλιών κατά 6 ώρες (δηλαδή, κατά ένα τέταρτο του ημερησίου κύκλου), το πουλί αναπροσανατολίζει την κατεύθυνση της μετανάστευσής του κατά 90 μοίρες (δηλαδή, κατά ένα τέταρτο του κύκλου κατευθύνσεων) από τη σωστή κατεύθυνση της πυξίδας. Πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι και η πεταλούδα *Μονάρχης* έχει μια πραγματική ηλιακή πυξίδα και ότι αντιδρά στις μεταβολές της ένδειξης του εικοσιπεντάωρου ρολογιού της με τον ίδιο τρόπο που αντιδρά το ψαρόνι.

Οι άνθρωποι επέδειξαν μεγαλύτερη βραδύτητα στην επίλυση τόσο βασικών προβλημάτων πλοήγησης. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα της ακριβούς μέτρησης του γεωγραφικού μήκους δεν επιλύθηκε παρά μόνο το 1759, όταν ο John Harrison επινόησε ένα πολύ ακριβές χρονόμετρο για τα πλοία. Ουσιαστικά, το πρόβλημα του γεωγραφικού μήκους είναι παρόμοιο με αυτό που έπελυσαν τα ζώα ήδη από την αρχή της βιολογικής τους ιστορίας, δηλαδή η "χαρτογράφηση" πληροφοριών από έναν κύκλο -του εικοσιπεντάωρου χρονόμετρου- σε έναν άλλον, ο οποίος δίνει την απαιτούμενη συνταγή της φυσικής θέσης πάνω σ' ένα χάρτη 360 μοιρών. Έχουμε συνηθίσει να "βλέπουμε" τον χρόνο όχι ως έναν γραμμικό ρυθμό, αλλά ως έναν κύκλο, επειδή αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο τον παρατάνουμε πάνω στην πλάκα του ρολογιού. Επειδή οι δείκτες κινούνται σε κύκλο 360 μοιρών, οποιαδήποτε ώρα της ημέρας μπορεί να παρασταθεί ως ένα σημείο πάνω στον κύκλο αυτόν. Έχουμε επίσης συνηθίσει να συλλαμβάνουμε τις αποστάσεις ως γραμμικές, αλλά και αυτές μπορούν να παρασταθούν ως μια θέση πάνω σ' ένα γεωγραφικό κύκλο.

Οποιοδήποτε σημείο πάνω στη γη μπορεί να προσδιορισθεί από τις χωρικές συντεταγμένες, όταν χαρτογραφείται ως γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Γεωγραφικό πλάτος είναι η θέση στον άξονα βορρά-νότου, δηλαδή η απόσταση από τους δύο πόλους, και απεικονίζεται πάνω στον χάρτη με παράλληλες οριζόντιες γραμμές που περπιτρέχουν τη γη. Σημείο μηδέν του γεωγραφικού πλάτους είναι ο ισημερινός. Το γεωγραφικό πλάτος μπορεί να υπολογισθεί από τη γωνία που σχηματίζει ο ήλιος κατά τη μεσουράνησή του σε σχέση με τον ορίζοντα. Στον ισημερινό ο ήλιος θα βρίσκεται σχεδόν κατακόρυφα κατά τη μεσουράνηση, αλλά όσο κανείς ταξιδεύει προς τον βορρά ή τον νότο, το ύψος του ήλιου κατά τη μεσουράνηση μειώνεται.

Το γεωγραφικό μήκος απεικονίζεται με τους κατακόρυφους κύκλους που ονομάζονται μεσημβρινοί και περνούν από τους δύο πόλους. Το γεωγραφικό μήκος σημειώνεται επίσης πάνω σ' έναν άλλο κύκλο, με σημείο 0 στον μεσημβρινό του Γκρινβίτσιτς. Το γεωγραφικό μήκος μπορεί να βρεθεί με τη σύγκριση της τοπικής ώρας στην τρέχουσα θέση ενός πλοίου με την ώρα του λιμανιού της προέλευσής του. Επειδή η γη κάνει έναν πλήρη κύκλο 360 μοιρών σε 24 ώρες (ή 15 μοίρες κάθε ώρα), μπορούμε να υπολογίσουμε το γεωγραφικό μήκος αν γνωρίζουμε ταυτόχρονα την ώρα στην τρέχουσα θέση και την ώρα στη θέση αναφοράς ή προέλευσης, όταν ο ήλιος βρίσκεται σε ένα δεδομένο ύψος πάνω από τον ορίζοντα. Για παράδειγμα, αν υπάρχει διαφορά δύο ωρών ανάμεσα στην ώρα που ο ήλιος μεσουρανή στην τρέχουσα θέση και στην ώρα που μεσουρανή στη θέση προέλευσης, τότε η συγκεκριμένη θέση θα βρίσκεται 30 μοίρες δυτικά της θέσης προέλευσης. Η πρόκληση για τον άνθρωπο ήταν να δημιουργήσει ένα χρονόμετρο που να μπορεί να μετρά με ακρίβεια τον χρόνο στη θάλασσα, όπου οι κινήσεις της θάλασσας, οι μεταβολές της θερμοκρασίας και η υγρασία επηρεάζουν την ακρίβεια.



Τορχειμένη γάτα, Αίγυπτος, μετά το 30 π.Χ., Βρετανικό Μουσείο.

α, β, γ. Πνευμαμένο πουτίκι σε ανατήρηση της πείραφς.

Ορισμένα είδη πουλιών, όπως τα εικονιζόμενα, δεν αποδερνούν τον χειμώνα, παρά μόνον όταν λιγοστεύει η τροφή τους.



Ο τρόπος με τον οποίο τα ζώα διανύουν τεράστιες αποστάσεις περνώντας τον ωκεανό δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητός. Τόσο οι θαλάσσιες χελώνες όσο και τα αλμπάτρος χρησιμοποιούν μια ηλιακή πυξίδα και μπορούν να υπολογίσουν τις αλλαγές θέσης από τη σχετική διαφορά ανάμεσα στο εσωτερικό τους ρολόκι και τη θέση του ήλιου. Όμως παίρνουν επίσης πληροφορίες για τη θέση τους από μια ποικιλία πηγών, όπως οι θέσεις των αστεριών στον νυχτερινό ουρανό και οι μεταβολές στο γεωμαγνητικό πεδίο της γης (ήλαδη), διαθέτουν μια εσωτερική μαγνητική πυξίδα).

Τι είναι το βιολογικό ρολόι; Για πολλά χρόνια ήταν περισσότερο γνωστά τα χαρακτηριστικά του βιολογικού ρολογιού, παρά η φύση του ίδιου του ρολογιού. Το βιολογικό ρολόκι εμφανίζει τρία βασικά χαρακτηριστικά: *περιοδικότητα*, *σταθερότητα* και *δυνατότητα επαναρρύθμισης*. Η *περιοδικότητα* αναφέρεται στη φυσική ρυθμικότητα που παρατηρείται

σε όλα τα επίπεδα βιολογικής οργάνωσης, από τα κύτταρα έως ολόκληρο το ζώο. Η *σταθερότητα* αναφέρεται στη σύμφυτη τάση των βιολογικών ρυθμών να διαγράφουν κύκλο, έστω και αν απουσιάζουν εμφανή περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Για παράδειγμα, αν κρατήσουμε ένα πουλί σε διαρκές σκοτάδι, αυτό θα εξακολουθήσει να εμφανίζει ένα σταθερό σχήμα ύπνου-εγρήγορσης, ακόμη και αν απουσιάζει το ηλιακό φως ως έναυσμα της εγρήγορσης. Όμως, με την πάροδο του χρόνου, οι κύκλοι αυτοί ξεφεύγουν από την αυστηρή εικοσπετράωρη περιοδικότητα και προσαρμόζονται σε μια περιοδικότητα "ελεύθερη". Το αποτέλεσμα είναι ότι τα ζώα που έχουν αποκοπεί από τη φυσική εναλλαγή φωτός-σκότους και έχουν αποκτήσει ελεύθερη περιοδικότητα, αποσυντονίζονται βαθμιαία από τον "πραγματικό χρόνο". Ο αποσυντονισμός αυτός δεν συμβαίνει όταν βρίσκονται σε φυσική (άγρια) κατάσταση, γιατί οι εξωτερικές ενδείξεις ρυθμίζουν καθημερινά το ρο-

λόι. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό της *επαναρρύθμισης*. Η πιο συνηθισμένη ένδειξη για την επαναρρύθμιση του ρολογιού είναι η εναλλαγή φωτός και σκότους και η σχετική διάρκεια του φωτός. Πειράματα που έγιναν στη Δεκαστία το 1960 σε αιχμάλτους ιπτάμενους σκίουρους, απέδειξαν ότι μια εκπομπή φωτός διάρκειας ελαχίστων μόνο λεπτών ήταν αρκετή για να επαναρρυθμιστεί το ρολόι του ζώου και να επαναφέρει τον "ελεύθερο" ρυθμό του στον ρυθμό του εξωτερικού κόσμου.

Άλλα περιβαλλοντικά ερεθίσματα, όπως οι ρυθμικές μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα, μπορούν να χρησιμοποιούν επίσης ως ενδείξεις για την επαναρρύθμιση του βιολογικού ρολογιού. Όταν ο χρόνος του εσωτερικού ρολογιού του ζώου διαφέρει πολύ από τον εξωτερικό χρόνο, τότε η επαναρρύθμιση του μπορεί να απαιτήσει μέρες ή ακόμη και εβδομάδες. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σε όσους ταξιδεύουν αεροπορικά σε μεγάλες αποστάσεις με το όνομα "χρονικό χάσμα" (*jet lag*).

Οι μηχανισμοί που διέπουν τα βιολογικά ρολόγια δεν είναι πολύ γνωστοί. Σε μερικά έντομα, όπως οι κατσαρίδες και οι σκόροι του μεταεαίου, φαίνεται πως το ρολόι εντοπίζεται στον οπτικό λοβό. Οι νευρώνες του αμφιβληστροειδούς χιτώνου σε δύο είδη μαλακίων, στο θαλάσσιο σαλιγκάρι (*Bulla gouldiana*) και στον θαλάσσιο λαγό (*Aplysia californica*), εμφανίζουν εικοσπετράωρους ρυθμούς στην ηλεκτρική τους συμπεριφορά, ακόμη και όταν τα ζώα είναι απομονωμένα σε συνθήκες εργαστηρίου. Η γνωστή μίγα των φρούτων *Drosophila* είναι μέχρι στιγμής το πιο χρήσιμο πειραματόζωο για την κατανόηση της μοριακής βάσης της εικοσπετράωρης ρύθμισης. Οι εικοσπετράωροι κύκλοι στις φρούτομυγες μελετώνται με τη μέτρηση της ατομικής τους δραστηριότητας στη διάρκεια λίγων ημερών ή με τη μακρόχρονη «χαρτογράφηση» της εμφάνισης νυμφών σε πληθυσμούς των εντόμων αυτών. Μεταλλάξεις στο γονίδιο της *περίοδου* του εικοσπετράωρου ρολογιού της *Δροσόφιλας* αλλοιώνουν το

μήκος των κύκλων ή και προκαλούν την πλήρη εξάφηση των κύκλων. Η λειτουργία του γονιδίου της περιόδου συνίσταται στη ρύθμιση της γονιδιακής μεταγραφής των πρωτεϊνών. Οι εικοσιπεντάωροι ρυθμοί της φρουτούμιας ελέγχονται από την κυκλικότητα που είναι εγγενής στην παραγωγή πρωτεϊνών από ειδικά γονίδια. Στα πουλιά και στα θηλαστικά το ρολόι είναι εντοπισμένο σε ένα τμήμα του εγκεφάλου που ονομάζεται *υπερχιασματικός πυρήνας*, ένα σύμπλεγμα νευρικών κυττάρων που βρίσκεται κοντά στον υποθάλαμο, το τμήμα του εγκεφάλου το οποίο ρυθμίζει επίσης την έκκριση διαφόρων ορμονών που είναι σημαντικές για τον έλεγχο της πένας, της δίψας και της αναπαραγωγής. Παρά τις βαθιές διαφορές της δομής του εγκεφάλου ανάμεσα στα θηλαστικά και τα έντομα, τα ποντίκια και τα χήμπερ με μεταλλαγμένα γονίδια ρολογιού εμφανίζουν παρόμοιες αλλοιώσεις του εικοσιπεντάωρου ρυθμού τους με τις φρουτούμιας που έχουν υποστεί μεταλλαγή του γονιδίου της περιόδου.

Η κατανόηση της γενετικής και των μηχανισμών που διέπουν τα βιολογικά ρολόγια των ζώων υπόσχεται σημαντικές εφαρμογές στην ιατρική του ανθρώπου. Οι δυσλεπουργίες του εικοσιπεντάωρου ρυθμού είναι συνηθισμένες στα ηλικιωμένα άτομα. Καθώς ο άνθρωπος γερνά, ο ύπνος γίνεται πιο αποσπασματικός και τα σχήματά του ύπνου προοδευτικά αποσυντονίζονται και τείνουν προς ένα ελεύθερο σχήμα (που μπορεί να συγκριθεί με αυτό των ανθρώπων που έχουν απομονωθεί πλήρως από τις εξωτερικές ενδείξεις φωτός). Παρόμοιες αποδιοργανώσεις του ρυθμού έχουν διαπιστωθεί επίσης σε ηλικιωμένα χήμπερ. Επειδή στα χήμπερ έχουν εντοπισθεί αρκετά γονίδια που κατακλύθουν το εικοσιπεντάωρο ρολόι και επειδή η εικοσιπεντάωρη συμπεριφορά των χήμπερ είναι εύκολο να μελετηθεί, τα ζώα αυτά είναι χρήσιμα πειραματόζωα για την κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στο γήρας και την εικοσιπεντάωρη λειτουργία. Έχει διατυπω-

θεί η θεωρία ότι μπορεί και το ίδιο το γήρας να είναι μια μεγάλη κλίμακα αποδιοργάνωση των εικοσιπεντάωρων ρυθμών και μια βαθμιαία αποκοπή των "δευτερευόντων" ρολογιών, που έχουν όλα τα κυττάρα, από το κύριο ρολόι που βρίσκεται στον εγκέφαλο.

Η έρευνα των εικοσιπεντάωρων ρυθμών βρίσκει επίσης εφαρμογές στον προγραμματισμό της φαρμακευτικής αγωγής, της χημειοθεραπείας, ακόμη και των χειρουργικών επεμβάσεων. Έχει αποδειχθεί ότι τα συμπτώματα διαφόρων ασθενειών, όπως ο πυρετός, ο αριθμός των λευκών κυττάρων σε κάποιες λευχαιμίες και οι μεταβολές στο κατώφλι του πόνου, εμφανίζουν σταθερή ρυθμικότητα σε ομαλές φυσιολογικές διαδικασίες, όμως η σημασία αυτής της παρατήρησης έχει σε μεγάλο βαθμό αγνοηθεί από την ιατρική κοινότητα. Όλοι μας είμαστε εξοικειωμένοι με τις οδηγίες να παίρνουμε τα συνιστώμενα φάρμακα σε τακτά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όμως οι διακυμάνσεις των κανονικών φυσιολογικών διαδικασιών στη διάρκεια του εικοσιπεντάωρου μεταβάλλουν την απορρόφηση, την κατανομή, τον μεταβολισμό και την απέκκριση του φαρμάκου από το οργανικό σύστημα. Έχει αποδειχθεί ότι οι φαρμακοθεραπείες για αλλεργίες, άσθμα, ορισμένους τύπους καρκίνου και για καρδιαγγειακά νοσήματα έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και λιγότερες επιβλαβείς παρενέργειες, όταν χορηγούνται σύμφωνα με τις συγκεκριμένες χρονοεξαρτώμενες απαιτήσεις των ιστών και των οργάνων στα οποία απευθύνονται. Αντίστοιχα, ορισμένα στοιχεία υποδεικνύουν ότι η χημειοθεραπεία μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική στην καταστροφή καρκινικών κυττάρων που κάνουν μετάσταση και να μειωθεί η καταστροφή που προκαλούν σε υγιή κύτταρα, αν ληφθούν υπόψη οι εικοσιπεντάωροι ρυθμοί. Ο προσδιορισμός του χρόνου χειρουργίας του καρκίνου του μαστού σε συνάρτηση με τον έμμηνο κύκλο της ασθενούς έχει αποδειχθεί από σχετική μελέτη ότι έχει σημαντικά αποτελέσματα για την πιθανότητα και τον χρο-

νικό προσδιορισμό της επανεμφάνισης των όγκων.

Η μελέτη των ρολογιών των ζώων και της χρονομετρησης που πραγματοποιείται θα δώσει στους ερευνητές τη δυνατότητα να προσδιορίσουν πώς μπορούν τα ζώα να συντονίζουν συμπεριφορές τόσο πολύπλοκες, όπως η αναπαραγωγή, η μετακίνηση και η χημέρια νάρκη, με εξωτερικές κυκλικές ενδείξεις από το φυσικό περιβάλλον και με τους ρυθμούς που είναι εγγενείς σε εσωτερικές φυσιολογικές διαδικασίες των ατόμων. Οι πιο πρόσφατες γνώσεις για τη μοριακή βάση αυτών των βιολογικών ρολογιών θα προσφέρουν επίσης στους ερευνητές τα εργαλεία που χρειάζονται για να κατανοήσουν τις διαφορές αλληλεπιδράσεις της βιολογικής ρυθμικότητας και της λειτουργίας του εγκεφάλου, τη γενετική βάση της συμπεριφοράς και τις θεραπευτικές ιατρικές εφαρμογές.

Μετάφραση: I. Φ. Χαχλιούδης

Animal Timekeeping: How Animals Calculate Time and Space

Penny S. Reynolds

Animals orient themselves in time and space by means of internal daily (circadian) and annual (circannual) clocks. Physiological rhythms and the daily and seasonal activities of animals depend strongly on body size: small animals live faster and die younger than large animals. However, these intrinsic rhythms need to be coupled to the daily and yearly rhythms of the external world. Thus, animals need a "clock" to regulate and coordinate these rhythms. Circadian rhythms correspond to the time taken for the earth to rotate about the sun (solar day); lunar rhythms correspond to the time for the rotation of the moon around the earth (lunar month) and circannual rhythms correspond to the time taken for the earth to travel around the sun (solar year). Normal levels of many physiological traits, such as metabolism and body temperature, vary on a daily basis, whereas major activities such as migration are regulated on a circannual basis. Several genes controlling biological rhythms have been identified recently in a number of diverse organisms. Understanding the underlying genetic mechanisms of animal biological clocks will lead to new insights in such diverse time-dependent phenomena as aging, jet lag, and drug therapy, all of which have important implications for human health.

P.S.R.