

Η πτήση των ψαρονιών*

Το ζήτημα των αλληλεπιδράσεων είναι σημαντικό, ακόμα και σε ό,τι αφορά την κατανόηση ψυχολογικών, κοινωνικών και οικονομικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, έχουμε εστιάσει στον τρόπο με τον οποίο κάθε μέλος του σμήνους καταφέρει να επικοινωνήσει προκειμένου αυτό να κινηθεί συνεκτικά, δημιουργώντας μια ενιαία, πλην όμως συλλογική και πολλαπλή οντότητα.

ΕΙΝΑΙ ΣΥΝΑΡΠΑΣΤΙΚΟ ΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΕΙ ΚΑΝΕΙΣ τη συλλογική συμπεριφορά των ζώων, είτε πρόκειται για σμήνη πτηνών είτε για κοπάδια ψαριών ή θηλαστικών.

Την ώρα του ηλιοβασιλέματος, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα σμήνη να σχηματίζουν φαντασμαγορικές εικόνες, χιλιάδες μαύρα στίγματα που χορεύουν και ξεχωρίζουν μπροστά σ' έναν ουρανό με εναλλασσόμενα χρώματα. Τα βλέπουμε να κινούνται όλα μαζί χωρίς να συγκρούονται ή να διασκορπίζονται, ξεπερνώντας εμπόδια, παίρνοντας αποστάσεις κι έπειτα πλησιάζοντας ξανά, αναδιαμορφώνοντας συνεχώς τη χωρική τους διάταξη, λες και υπάρχει κάποιος μαέστρος που δίνει εντολές τις οποίες εκτελούν όλα μαζί. Μπορούμε να περάσουμε άπειρο χρόνο

* Το ψαρόνι (επιστημονική ονομασία *Sturnus vulgaris*) είναι είδος πτηνού, ευρέως διαδεδομένο σε ολόκληρο το βόρειο ημισφαίριο και ενδημικό στην ευρασιατική ζώνη. Οι ευρωπαϊκοί του πληθυσμοί τον χειμώνα μεταναστεύουν προς τα νότια και τα δυτικά. Στην Ελλάδα είναι γνωστό και ως γκάροκνολο, γκαραβέλι ή ζααβέλι, χειμώνι και μαυροπούλι. (Σ.τ.Μ.)

κοιτάζοντάς τα, καθώς το θέαμα ανανεώνεται διαρκώς, λαμβάνοντας διαφορετικές και απρόβλεπτες μορφές. Μερικές φορές, ακόμα και μπροστά σε αυτή την αυθεντική ομορφιά, πυροδοτείται η επαγγελματική διαστροφή του επιστήμονα, με αποτέλεσμα το μυαλό του να κατακλύζεται από πλήθος ερωτημάτων. Υπάρχει όντως κάποιος μαέστρος ή μήπως αυτή η συλλογική συμπεριφορά οργανώνεται από μόνη της; Πώς γίνεται η πληροφορία να διαδίδεται τόσο γρήγορα σε ολόκληρο το σμήνος; Πώς είναι δυνατόν να αλλάζουν με τέτοια ταχύτητα οι συνδυασμοί; Πώς κατανέμονται η ταχύτητα και η επιτάχυνση των πουλιών; Πώς γίνεται να στρίβουν ταυτόχρονα χωρίς να συγκρούονται; Αρκούν, άραγε, μερικοί απλοί κανόνες αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα ψαρόνια (ή μαυροπούλια) για να παραχθούν τόσο ρευστές και ανεμπόδιστες συλλογικές κινήσεις όπως αυτές που παρατηρούμε στον ουρανό της Ρώμης;

Όταν είμαστε περίεργοι και θέλουμε να μάθουμε τις απαντήσεις στα ερωτήματα που θέτουμε, αρχίζουμε να ψάχνουμε: κάποτε στα βιβλία, σήμερα στο διαδίκτυο. Όταν είμαστε τυχεροί, βρίσκουμε τις απαντήσεις. Αλλά όταν αυτές δεν υπάρχουν επειδή κανένας δεν τις γνωρίζει, και εφόσον είμαστε πραγματικά περίεργοι, αρχίζουμε να αναρωτιόμαστε μήπως θα έπρεπε να βρούμε εμείς την απάντηση. Το γεγονός ότι κανένας δεν τη βρήκε ωριότερα δεν μας πτοεί· στο κάτω κάτω αυτή είναι η δουλειά μας: να φανταζόμαστε ή να κάνουμε ό,τι κανένας δεν έχει ξανακάνει ποτέ άλλοτε. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούμε να περάσουμε τη ζωή μας προσπαθώντας να ανοίξουμε θωρακισμένες πόρτες για τις οποίες δεν έχουμε το κλειδί. Κατά συνέπεια, πριν ξεκινήσουμε πρέπει να καταλάβουμε αν διαθέτουμε τις ικανότητες και τα τεχνικά εργαλεία που θα μας επιτρέψουν να φτάσουμε μέχρι τέλους· κανείς δεν μπορεί να μας διαβεβαιώσει ότι θα τα καταφέρουμε, πρέπει κυριολεκτικά να βουτήξουμε στα βαθιά, αλλά, αν δεν ξέρουμε καλό κολύμπι, τότε είναι καλύτερα να τα παρατήσουμε.

Πολύπλοκες συλλογικές συμπεριφορές

Η πτήση των ψαρονιών με γοήτευε πάντοτε πολύ, επειδή σχετιζόταν με τον πυρήνα όχι μόνο των δικών μου ερευνών, αλλά και πολλών άλλων μελετών της σύγχρονης φυσικής, που δεν είναι άλλος από την κατανόηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος που αποτελείται από ένα πλήθος αλληλεπιδρώντων συστατικών στοιχείων (φορέων). Στη φυσική, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση, οι φορείς μπορεί να είναι ηλεκτρόνια, άτομα, σπιν ή μόρια· έχουν πολύ απλούς κανόνες συμπεριφοράς, όμως όλοι μαζί οδηγούν σε μια εξαιρετικά πολύπλοκη συλλογική συμπεριφορά. Ήδη από τον 19ο αιώνα, η στατιστική φυσική προσπαθεί να απαντήσει σε ερωτήματα όπως: Γιατί ένα υγρό σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες βράζει ή ψύχεται, ή γιατί κάποιες ουσίες είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος και μεταδίδουν τη θερμότητα (π.χ. τα μέταλλα), ενώ άλλες είναι μονωτές κ.ο.κ. Η απάντηση σε τούτα τα ερωτήματα έχει βρεθεί από καιρό. Για άλλα εξακολουθούμε να αναζητούμε τις απαντήσεις.

Σε όλα αυτά τα προβλήματα φυσικής, μπορούμε να καταλάβουμε με ποσοτικό τρόπο πώς προκύπτει η συλλογική συμπεριφορά, ξεκινώντας από απλούς κανόνες αλληλεπίδρασης μεταξύ μεμονωμένων φορέων. Η πρόκληση έγκειται στο να επεκτείνουμε τη δυνατότητα εφαρμογής των τεχνικών της στατιστικής μηχανικής από τις άψυχες οντότητες στα ζώα (π.χ. στα ψαρόνια). Τα αποτελέσματα δεν θα ήταν ενδιαφέροντα μόνο για την ηθολογία και την εξελικτική βιολογία, αλλά μακροπρόθεσμα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη κατανόηση των οικονομικών και κοινωνικών φαινομένων στις ανθρωπιστικές επιστήμες. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις έχουμε έναν μεγάλο αριθμό ατόμων που επηρεάζουν το ένα το άλλο και, σε γενικές γραμμές, είναι συχνά αναγκαίο να έχουμε γνώση της σχέσης που υπάρχει ανάμεσα στις συμπεριφορές των μεμονωμένων ατόμων και τις συλλογικές συμπεριφορές.

Ο μεγάλος αμερικανός φυσικός Φίλιπ Γουόρρεν Άντερσον (βραβείο Νομπέλ, 1977) είχε αναπτύξει αυτή την ιδέα στο προκλητικό άρθρο του «More Is Different» (1972), στο οποίο υποστήριζε ότι η αύξηση του αριθμού των συστατικών μερών ενός συστήματος δεν προκαλεί μόνο ποσοτική αλλά και ποιοτική αλλαγή: έτσι, το βασικό εννοιολογικό πρόβλημα που θα έπρεπε να αντιμετωπίσει η φυσική ήταν να κατανοήσει τις σχέσεις ανάμεσα στους μικροσκοπικούς κανόνες και στη μακροσκοπική συμπεριφορά σε μια ευρεία ποικιλία διαφορετικών συστημάτων. Ο Άντερσον διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της θεωρίας της πολυπλοκότητας και θα τον συναντήσουμε ξανά σε ένα από τα επόμενα κεφάλαια.

Σμίνη ψαρονιών

Για να εξηγήσουμε κάτι, οφείλουμε πρώτα να το γνωρίσουμε· στη συγκεκριμένη περίπτωση, μας έλειπε ένα βασικό δεδομένο: έπρεπε να κατανοήσουμε τις κινήσεις των σμηνών στον χώρο, όμως αυτή η πληροφορία δεν ήταν διαθέσιμη εκείνη την εποχή. Πράγματι, η τεράστια ποσότητα βίντεο και φωτογραφιών των σμηνών που είχαμε στη διάθεσή μας (βρίσκονται εύκολα και στο διαδίκτυο) είχαν τραβηχτεί από μία μόνο οπτική γωνία, με αποτέλεσμα να στερούνται οποιαδήποτε τριδιάστατη πληροφορία. Κατά κάποιον τρόπο, ήμασταν σαν τους δεσμώτες στον μύθο του σπηλαίου του Πλάτωνα, οι οποίοι, βλέποντας μόνο τις διδιάστατες σκιές που προβάλλονταν στο τοίχωμα του σπηλαίου, αδυνατούσαν να συλλάβουν την τριδιάστατη φύση των αντικειμένων.

Ακριβώς αυτή η δυσκολία ήταν που έκανε τη μελέτη της κίνησης των ψαρονιών τόσο ενδιαφέρουσα για μένα: επρόκειτο για ένα ολοκληρωμένο εγχείρημα από μόνο του. Περιελάμβανε τον σχεδιασμό του πειράματος, τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων, την ανάπτυξη υπολογιστικών κωδίκων για τις προσομοιώσεις

και, τέλος, την ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Γνωρίζαμε ότι οι μέθοδοι της στατιστικής φυσικής, που ήταν ανέκαθεν ο τομέας της έρευνάς μου, θα ήταν απαραίτητες για την τριδιάστατη ανασύσταση των ιχνών των ψαρονιών, αλλά εκείνο που πραγματικά με συνάρπαζε ήταν η συμμετοχή μου στον σχεδιασμό και στην υλοποίηση του πειραματικού σκέλους. Κατά κανόνα, εμείς οι θεωρητικοί φυσικοί απέχουμε από το εργαστήριο και εργαζόμαστε με αφηρημένες έννοιες. Η επίλυση ενός πραγματικού προβλήματος σημαίνει ότι πρέπει να ελέγχουμε πάρα πολλές μεταβλητές, οι οποίες, στην προκειμένη περίπτωση, κυμαίνονταν από την ανάλυση των εστιακών αποστάσεων των φωτογραφικών φακών έως τη βέλτιστη τοποθέτηση των καμερών, και από την ικανότητα αποθήκευσης δεδομένων έως τις τεχνικές ανάλυσης. Κάθε λεπτομέρεια καθορίζει την επιτυχία ή μη του πειράματος· όταν σκέφτεται κανείς «θεωρητικά», δεν έχει την παραμικρή ιδέα για τα προβλήματα που προκύπτουν «στο πεδίο». Γι' αυτό και δεν μου άρεσε ποτέ να βρίσκομαι πολύ μακριά από το εργαστήριο.

Τα ψαρόνια είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα ζώα. Πριν από αιώνες, ζούσαν τους θερμούς μήνες στη Βόρεια Ευρώπη και διαχειμάζαν στη Βόρεια Αφρική. Σήμερα οι χειμερινές θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί εξαιτίας της υπερθέρμανσης του πλανήτη, ενώ παράλληλα οι πόλεις μας έχουν γίνει πολύ πιο ζεστές τόσο λόγω της αύξησης του μεγέθους τους, όσο και επειδή υπάρχουν πολυάριθμες πηγές θερμότητας (οικιακή θέρμανση, κυκλοφοριακή κίνηση). Το αποτέλεσμα είναι πολλά ψαρόνια να μη διασχίζουν πια τη Μεσόγειο και να μένουν για να ξεχειμωνιάσουν σε διάφορες παράκτιες πόλεις της Ιταλίας, ανάμεσα στις οποίες και η Ρώμη, όπου οι χειμώνες είναι πιο ήπιοι απ' ό,τι στο παρελθόν.

Τα ψαρόνια καταφθάνουν στις αρχές του Νοέμβρη και ξαναφεύγουν στις αρχές του Μάρτη. Συνήθως ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια τις μετακινήσεις τους: κατά πάσα πιθανότητα, ο χρόνος

της μετανάστευσής τους δεν εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο από ποικίλους αστρονομικούς παράγοντες, όπως η διάρκεια του ηλιακού φωτός. Στη Ρώμη, τη νύχτα βρίσκουν αειθαλή δέντρα που τα προστατεύουν από τον άνεμο· τη μέρα, η τροφή στην πόλη είναι λιγοστή και έτσι μετακινούνται ανά μικρές ομάδες των περίπου εκατό ατόμων για να τραφούν στην ύπαιθρο που εκτείνεται πέρα από τον Grande Raccordo Anulare, τον κεντρικό αυτοκινητόδρομο που περιβάλλει τη Ρώμη. Είναι κοινωνικά ζώα που έχουν συνηθίσει να ζουν ομαδικά: όταν κάθονται σε ένα χωράφι, τα μισά τρώνε με την ησυχία τους, ενώ τα άλλα μισά στέκονται στην άκρη προσέχοντας μήπως έρθει κάποιος θηρευτής· όταν έπειτα μετακινούνται στο επόμενο χωράφι, οι ρόλοι αντιστρέφονται. Το βράδυ επιστρέφουν στη ζεστασιά της πόλης και, προτού κουρνιαξουν στα δέντρα, σχηματίζουν εξαιρετικά πολυπληθείς ομάδες που στροβιλίζονται στον ουρανό της πρωτεύουσας. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθούν να είναι ζώα ευαίσθητα στο κρύο του χειμώνα: ύστερα από νύχτες που φυσάει δυνατός, παγωμένος βοριάς, είναι συνηθισμένο να βρίσκει κανείς πολλά από αυτά νεκρά, ξυλιασμένα απ' το κρύο, κάτω από δέντρα που δεν τους παρείχαν επαρκές καταφύγιο.

Επομένως, το να επιλέξουν ένα καλό μέρος για ύπνο είναι ζήτημα ζωής και θανάτου. Είναι πολύ πιθανό τούτες οι βραδινές εναέριες χορογραφίες να αποτελούν ένα σήμα —ορατό ακόμα και από μακριά— για την ύπαρξη ενός μέρους κατάλληλου για διανυκτέρευση. Είναι σαν να ανεμίζει μια τεράστια, εξαιρετικά φανταχτερή σημαία: ένα ξάστερο χειμωνιάτικο σούρουπο, μπόρεσα να διακρίνω με γυμνό μάτι τους ελιγμούς των σμηγών σε απόσταση περίπου δέκα χιλιομέτρων· ήταν γκριζωπά στίγματα που κινούνταν σχεδόν σαν αμοιβάδες στο φόντο ενός ουρανού που είχε ακόμη μια λεπτή λωρίδα φωτεινού λευκού λίγο πέρα απ' τον ορίζοντα. Οι πρώτες μικρές ομάδες που έρχονται από τα χωράφια αρχίζουν να χορεύουν όλο και πιο ξέφρενα καθώς λιγοστεύει το φως. Σιγά σιγά καταφθάνουν οι αργοπορημένοι και τελικά σχηματίζονται

σμήνη χιλιάδων ατόμων, τα οποία μισή ώρα μετά το ηλιοβασίλεμα, όταν το φως έχει πλέον χαθεί, ορμούν ξαφνικά προς τα δέντρα, που μοιάζουν να τα καταπίνουν.

Συχνά, κοντά στα ψαρόνια εμφανίζεται και ο πετρίτης, ένα είδος γερακιού, που αναζητά το δείπνο του· αν δεν είστε σε επιφυλακή για την εμφάνισή του, είναι πολύ πιθανό να περάσει τελείως απαρατήρητος: η προσοχή του παρατηρητή είναι συνήθως επικεντρωμένη στα ψαρόνια, με αποτέλεσμα το γεράκι να το διακρίνουν μόνο όσοι το αναζητούν με το βλέμμα τους. Παρόλο που ο πετρίτης είναι ένα αρπακτικό με άνοιγμα φτερών που φτάνει το ένα μέτρο και με ταχύτητα (βουτιάς) που ξεπερνά τα 200 χιλιόμετρα ανά ώρα, τα ψαρόνια δεν είναι εύκολη λεία. Πράγματι, μια σύγκρουση στον αέρα με ένα ψαρόνι θα μπορούσε να προκαλέσει κάταγμα στα εύθραυστα φτερά του γερακιού — ατύχημα που, χωρίς συζήτηση, για το τελευταίο θα απέβαινε μοιραίο. Έτσι, το γεράκι δεν τολμά να εισέλθει μέσα στο σμήνος αλλά, αντίθετα, προσπαθεί να αρπάξει κάποιο απ' τα πτηνά που βρίσκονται στις άκρες του. Τα ψαρόνια αντιδρούν στην επίθεση του γερακιού, πλησιάζοντας το ένα το άλλο, πυκνώνοντας τις γραμμές τους και αλλάζοντας γρήγορα κατεύθυνση για να αποφύγουν τη θανάσιμη αρπάγη. Ορισμένοι από τους πιο θεαματικούς ελιγμούς που πραγματοποιούν τα ψαρόνια οφείλονται ακριβώς στην προσπάθειά τους να αποφύγουν τις επαναλαμβανόμενες επιθέσεις του πετρίτη, ο οποίος πρέπει να μοχθήσει πολύ προτού καταφέρει τελικά να αποσπάσει κάποια λεία. Είναι πιθανό πολλές από τις συμπεριφορές που παρουσιάζουν τα ψαρόνια να εξηγούνται από την ανάγκη τους να επιβιώσουν από αυτές τις εξαιρετικά τρομακτικές επιθέσεις.

Το πείραμα

Ας επανέλθουμε τώρα στο εγχείρημά μας. Η πρώτη δυσκολία ήταν να καταφέρουμε να αποκτήσουμε μια τριδιάστατη φωτογραφία

του σμήνους και του σχήματός του και στη συνέχεια, συνδυάζοντας πολλές διαδοχικές φωτογραφίες, να δημιουργήσουμε ένα τριδιάστατο βίντεο. Θεωρητικά το πρόβλημα ήταν εύκολο και μπορούσε να επιλυθεί με έναν απλό τρόπο: όλοι ξέρουμε πως για να δούμε τριδιάστατα αρκεί να χρησιμοποιήσουμε τα μάτια μας. Το να κοιτάζουμε ταυτόχρονα από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες, ακόμη κι αν αυτές είναι τόσο κοντινές όσο η απόσταση μεταξύ των ματιών μας, επιτρέπει στον εγκέφαλο να (υπολογίζει) την απόσταση ενός αντικείμενου και έτσι να κατασκευάζει τριδιάστατες εικόνες. Με το ένα μάτι μόνο, χάνεται η αντίληψη του βάρους της εικόνας. Μπορείτε εύκολα να διαπιστώσετε το εν λόγω φαινόμενο κλείνοντας το ένα σας μάτι και προσπαθώντας να πιάσετε με το ένα χέρι κάποιο αντικείμενο που βρίσκεται μπροστά σας: το χέρι σας θα αναζητήσει αυτό το αντικείμενο πιο μακριά ή πιο κοντά απ' ό,τι είναι στην πραγματικότητα. Αν, έπειτα, προσπαθήσετε να παίξετε τένις ή πινγκ πονγκ έχοντας το ένα μάτι δεμένο, η ήττα σας θα είναι βέβαιη. Ωστόσο, αυτό το σύστημα λειτουργεί καλά μόνο αν είμαστε σε θέση να ταυτοποιήσουμε το πουλί στη δεξιά φωτογραφική μηχανή με εκείνο στην αριστερή φωτογραφική μηχανή, εγχείρημα που μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε εφιάλτη αν σε κάθε φωτογραφία υπάρχουν χιλιάδες πουλιά.

Ήταν φανερό πως τα είχαμε βρει σκούρα. Στις ήδη υπάρχουσες μελέτες της επιστημονικής βιβλιογραφίας είχαν ανακατασκευαστεί με τριδιάστατο τρόπο μερικές φωτογραφίες που περιείχαν το πολύ περίπου είκοσι ζώα, των οποίων η ταυτοποίηση έγινε χειροκίνητα: εμείς, από την άλλη, θέλαμε να ανακατασκευάσουμε κάμποσες χιλιάδες φωτογραφίες, από τις οποίες η καθεμία περιελάμβανε αρκετές χιλιάδες πουλιά. Προφανώς, δεν μπορούσαμε να το καταφέρουμε με το χέρι αλλά, αντίθετα, έπρεπε να αναθέσουμε την ταυτοποίηση στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το να καταπιάνεται κανείς με ένα πρόβλημα δίχως να είναι επαρκώς έτοιμος γι' αυτό κυριολεκτικά προμηνύει καταστροφή.

Είχαμε ήδη αρχίσει να σκεφτόμαστε το πρόβλημα γύρω στο 1990, μετά τη σχετική πρόταση μιας νεαρής ερευνήτριας, της φυσικού Ρενάτα Σάρνο, αλλά η διαχείριση εκατοντάδων χιλιάδων φωτογραφιών σε φιλμ ήταν εξαιρετικά περίπλοκη· περίπου δεκαπέντε χρόνια αργότερα, η έλευση της ψηφιακής φωτογραφίας υψηλής ανάλυσης άλλαξε τα δεδομένα και έτσι επαναλάβαμε το εγχείρημα. Συγκροτήσαμε μια ομάδα στην οποία δεν συμμετείχαν μόνο φυσικοί (εκτός από εμένα, ο καθηγητής μου Νικόλα Καμπίμπο και δύο από τους καλύτερους μαθητές μου, ο Αντρέα Καβάνια και η Ιρένε Τζαρντίνα, αλλά και δύο ορνιθολόγοι, ο Ενρίκο Αλέβα και ο Κλάουντιο Καρέρε). Σε συνεργασία με τον αείμνηστο οικονομολόγο Μαρτσέλο Ντε Τσέκο, καθώς και άλλες ευρωπαϊκές ομάδες, το 2004 υποβάλαμε αίτημα χρηματοδότησης στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Το αίτημά μας έγινε δεκτό. Κατά συνέπεια είχαμε πάρει το πράσινο φως για να ξεκινήσουμε, προσκαλώντας σε συμμετοχή διάφορους προπτυχιακούς και διδακτορικούς φοιτητές και αγοράζοντας τον απαραίτητο εξοπλισμό.

Τοποθετήσαμε τις φωτογραφικές μας μηχανές στη σκεπή του Παλάτσο Μάσιμο, μια από τις έδρες του υπέροχου Εθνικού Ρωμαϊκού Μουσείου, με θέα στην πλατεία του Κεντρικού Σιδηροδρομικού Σταθμού, που εκείνα τα χρόνια (τα πρώτα δεδομένα συλλέχθηκαν μεταξύ Δεκεμβρίου 2005 και Φεβρουαρίου 2006) τα ψαρόνια την επέλεγαν πολύ συχνά ως μέρος κατάλληλο για ύπνο. Χρησιμοποιήσαμε εμπορικές φωτογραφικές μηχανές υψηλής τεχνολογίας, διότι οι βιντεοκάμερες ήταν ακόμη πολύ χαμηλής ευκρίνειας. Δύο φωτογραφικές μηχανές τοποθετημένες σε απόσταση είκοσι πέντε μέτρων μεταξύ τους μας επέτρεψαν να προσδιορίσουμε τη σχετική θέση δύο ψαρονιών που βρίσκονταν σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων μακριά μας, με χωρική ακρίβεια περίπου δέκα εκατοστών: αυτή η ακρίβεια ήταν αρκετή για να διακρίνουμε τα ψαρόνια που πετούν σε απόσταση περίπου ενός μέτρου το ένα από το άλλο. Επίσης, είχαμε προσθέσει

μια τρίτη μηχανή λίγα μέτρα μακρύτερα από τη μία από τις δύο, η οποία μας βοήθησε όταν δύο πτηνά επικαλύπτονταν μεταξύ τους σε μία από τις δύο βασικές φωτογραφικές μηχανές: αυτή η τρίτη μηχανή μάς παρείχε σημαντική βοήθεια σε αρκετές περιπτώσεις στις οποίες η ανακατασκευή ήταν ιδιαίτερα δύσκολη.

Οι κάμερες τραβούσαν φωτογραφίες ταυτόχρονα, με διαφορά ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου η μία από την άλλη (είχαμε κατασκευάσει έναν απλό ηλεκτρονικό μηχανισμό για τον έλεγχό τους), λαμβάνοντας πέντε καρέ ανά δευτερόλεπτο. Στην πραγματικότητα, σε κάθε σταθμό είχαν τοποθετηθεί δύο μηχανές σε επαφή μεταξύ τους, οι οποίες τραβούσαν εναλλάξ, έτσι ώστε να διπλασιάζεται η συχνότητα των εικόνων: στην ουσία παίρναμε δέκα φωτογραφίες ανά δευτερόλεπτο. Εντέλει αυτό δεν ήταν τόσο υποδεέστερο σε σύγκριση με μια βιντεοκάμερα, η οποία συνήθως τραβάει 25-30 φωτογραφίες ανά δευτερόλεπτο. Έτσι, ενώ χρησιμοποιούσαμε φωτογραφικές μηχανές, εντούτοις στην ουσία δημιουργούσαμε μικρά βίντεο.

Παραλείπω όλα τα τεχνικά προβλήματα που σχετίζονταν με την ευθυγράμμιση των φωτογραφικών μηχανών (που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μιας τεντωμένης πετονιάς), την εστίαση και τη βαθμονόμηση, και τη γρήγορη αποθήκευση του μεγάλου σε μεγαμπάιτ όγκου πληροφοριών. Εκείνο που έχει σημασία είναι ότι στο τέλος τα καταφέραμε, χάρη και στην επιμονή του Αντρέα Καβάνια, στον οποίο είχα παραχωρήσει πρόθυμα την ευθύνη της διεύθυνσης των διαφόρων εργασιών: αποδείχτηκε πολύ καλύτερος οργανωτής από εμένα, αφού μάλιστα ήταν απαλλαγμένος από τις πολλές άλλες δικές μου υποχρεώσεις.

Προφανώς, δεν χρειαζόταν μόνο να φτιάξουμε τα τριδιάστατα βίντεο, πράγμα πολύ απαιτητικό από τεχνική άποψη, αλλά και, στη συνέχεια, να ανακατασκευάσουμε τις τριδιάστατες θέσεις. Με τις τριδιάστατες ταινίες των κινηματογραφικών αιθουσών αυτό γίνεται εύκολα: κάθε μάτι βλέπει αυτό που έχει κινηματογραφηθεί

από μία κινηματογραφική κάμερα κι έπειτα ο εγκέφαλός μας, ο οποίος έχει υποστεί τη διαδικασία της φυσικής επιλογής που έχει διαρκέσει εκατομμύρια χρόνια, είναι απολύτως ικανός να φτάσει στην τριδιάστατη όραση, εντοπίζοντας τα αντικείμενα που βλέπει στον χώρο. Εμείς έπρεπε να πετύχουμε κάτι παρόμοιο χρησιμοποιώντας αλγορίθμους σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, κάτι που συνιστούσε το δεύτερο σκέλος του εγχειρήματός μας. Έτσι, εξαντλήσαμε όλο το ρεπερτόριο της στατιστικής ανάλυσης, των πιθανοτήτων και των εξελεγμένων μαθηματικών αλγορίθμων που είχαμε στη διάθεσή μας. Για πολλούς μήνες φοβόμασταν ότι δεν θα τα καταφέραμε: μερικές φορές αντιμετωπίζεις ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα και καταλήγεις με άδεια χέρια (δεν είναι δυνατόν να το ξέρεις εκ των προτέρων). Ευτυχώς, ύστερα από σκληρή δουλειά, και έχοντας επινοήσει τα απαραίτητα μαθηματικά εργαλεία, ανακαλύψαμε τη μέθοδο για να επιλύσουμε τις δυσκολίες, τη μία μετά την άλλη. Ως εκ τούτου, έναν χρόνο μετά τις αρχικές μας ποιοτικές φωτογραφίες, καταφέραμε να κατασκευάσουμε και τις πρώτες τριδιάστατα ανακατασκευασμένες φωτογραφίες.

Η μελέτη της πτήσης

Παρόλο που η μελέτη της συμπεριφοράς των ψαρονιών είναι προφανώς υπόθεση των βιολόγων, η ποσοτική μελέτη των τριδιάστατων κινήσεων των ατόμων απαιτεί μια ανάλυση που μπορεί να διεκπεραιωθεί μόνο από φυσικούς. Η ταυτόχρονη ανάλυση χιλιάδων πτηνών σε εκατοντάδες φωτογραφίες προκειμένου να ανακατασκευαστεί η τροχιά του κάθε μεμονωμένου δείγματος στον χώρο και τον χρόνο αποτελεί μια τυπική δραστηριότητα του επαγγέλματός μας. Οι τεχνικές που είναι κατάλληλες γι' αυτές τις αναλύσεις παρουσιάζουν πολλά κοινά με εκείνες που αναπτύξαμε για να επιλύσουμε προβλήματα στατιστικής φυσικής ή για να αναλύσουμε τεράστιες ποσότητες πειραματικών δεδομένων.

Υστερα από σχεδόν δύο χρόνια δουλειάς, ήμασταν οι μοναδικοί στον κόσμο που διέθεταν τριδιάστατες φωτογραφίες ομάδων από ψαρόνια. Με την παρατήρησή τους και μόνο, μάθαμε πολλά πράγματα. Όταν κοιτάζαμε τα σμήνη με γυμνό μάτι από το έδαφος, ένα από τα πιο εντυπωσιακά χαρακτηριστικά τους ήταν ο γρήγορος τρόπος με τον οποίο αλλάζει το σχήμα τους· είναι δύσκολο να το περιγράψει κανείς σε κάποιον που δεν το έχει δει ποτέ: στον ουρανό κινούνται αντικείμενα διαφορετικού σχήματος που ξαφνικά γίνονται μικρότερα, πιο πεπλατυσμένα, κι έπειτα διευρύνονται ξανά, αλλάζουν, γίνονται σχεδόν αόρατα και μετά πιο σκούρα. Η ποικιλία στο σχήμα και στην πυκνότητά τους είναι πραγματικά τεράστια.

Πολλές προσομοιώσεις πτήσεων, κατά τις οποίες προσπαθήσαμε να αναπαραγάγουμε αυτήν τη συμπεριφορά στον υπολογιστή, ξεκίνησαν από σμήνη που ουσιαστικά είχαν σφαιρικό σχήμα. Ωστόσο, οι πρώτες τριδιάστατες φωτογραφίες μάς έδειξαν ότι ένα σμήνος μοιάζει μάλλον με δίσκο. Ακριβώς γι' αυτό τον λόγο βλέπουμε το σχήμα να αλλάζει γρήγορα: ένα αντικείμενο σε σχήμα δίσκου, ανάλογα με την κατεύθυνση από την οποία το παρατηρούμε, μπορεί να φαντάζει πολύ μεγάλο και στρογγυλό αν το κοιτάζουμε από την επίπεδη πλευρά του ή πολύ στενότερο αν το κοιτάζουμε από το πλάι. Έτσι, η τεράστια και ταχύτατη μεταβολή του σχήματος και της πυκνότητας αποδεικνύεται πως είναι το τριδιάστατο αποτέλεσμα της αλλαγής προσανατολισμού του σμήνους σε σχέση με εμάς (εξήγηση που ενώ είχε προταθεί από τον Νικόλα Καμπίμπο αρκετά προτού διεξαχθεί το πείραμα, εντούτοις εμείς, χωρίς τα σχετικά παρατηρησιακά δεδομένα, δεν μπορούσαμε να δεχτούμε απλώς με βάση τη διαίσθησή του).

Προς μεγάλη μας έκπληξη, ανακαλύψαμε ότι η πυκνότητα στα άκρα σε σχέση με εκείνη στο κέντρο του σμήνους είναι σχεδόν κατά 30% μεγαλύτερη. Με άλλα λόγια, τα ψαρόνια πετούν πιο κοντά το ένα στο άλλο όταν βρίσκονται στα άκρα παρά στο κέντρο (περίπου, δηλαδή, όπως συμβαίνει στα γεμάτα λεωφορεία, στα οποία

μερικές φορές ο συνωστισμός είναι μεγαλύτερος κοντά στις πόρτες, όπου συγκεντρώνονται οι άνθρωποι που μόλις ανέβηκαν, αυτοί που θέλουν να κατέβουν, αλλά και όσοι θέλουν να παραμείνουν στο λεωφορείο). Αν, με έναν αρκετά αφελή τρόπο, θεωρούσαμε τα άτομα ενός σμήνους ως σωματίδια που έλκουν το ένα το άλλο, θα περιμέναμε ότι η πυκνότητα θα ήταν μεγαλύτερη στο κέντρο και θα μειωνόταν στα άκρα· απεναντίας, παρατηρείται ακριβώς το αντίθετο. Επίσης, τα σμήνη έχουν σαφώς καθορισμένα άκρα: σπάνια ένα μεμονωμένο πουλί απομακρύνεται από την ομάδα. Κατά πάσα πιθανότητα, αυτή η συμπεριφορά έχει βιολογική προέλευση, αποτελώντας μια μορφή άμυνας στις επιθέσεις των γερακιών. Ένα μεμονωμένο πουλί αποτελεί εύκολο θήραμα και όσο πιο κοντά μεταξύ τους βρίσκονται τα πουλιά στα άκρα, τόσο πιο δύσκολο είναι να τα πιάσει κάποιος πετρίτης· τα πουλιά στα άκρα τείνουν να πλησιάζουν το ένα το άλλο για αμυντικούς σκοπούς, όμως εκείνα που βρίσκονται στο κέντρο δεν χρειάζεται να στριμώχνονται για να νιώθουν πιο ασφαλή: τα προστατεύουν ήδη οι σύντροφοί τους στις άκρες του σμήνους.

Παρατηρώντας τις αρχικές μας φωτογραφίες, ανακαλύψαμε ότι κάθε πουλί έχει την τάση να κρατά μεγαλύτερη απόσταση από τον σύντροφό του που βρίσκεται μπροστά ή πίσω του σε σχέση με εκείνους που είναι δίπλα του. Κάτι, δηλαδή, σαν αυτό που συμβαίνει σε έναν αυτοκινητόδρομο: ενώ είναι απολύτως φυσιολογικό δύο αυτοκίνητα να έχουν πλευρική απόσταση μερικών μέτρων, ταυτοχρόνως δεν συνιστάται καθόλου ένας οδηγός να κρατά απόσταση μόλις δύο μέτρων από το προπορευόμενο όχημα.

Επιπλέον, η τάση των πτηνών να απομακρύνονται από τα άτομα που πετούν μπροστά τους και να μένουν πιο κοντά σε εκείνα που βρίσκονται στο πλάι τους παρατηρείται τόσο στις πιο συμπαγείς ομάδες (μέση απόσταση περίπου ογδόντα εκατοστών), όσο και στις πολύ πιο αραιές ομάδες (μέση απόσταση περίπου δύο μέτρων). Αυτό το φαινόμενο δεν εξαρτάται από την απόσταση

ανάμεσα στα πτηνά. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι δεν οφείλεται σε κάποιο πρόβλημα δυναμικής, όπως όταν δύο αεροσκάφη πρέπει να διατηρούν τη μεταξύ τους απόσταση ώστε να αποφεύγουν τις αναταράξεις, διαφορετικά οι συνέπειες θα ήταν πολύ μικρότερες όταν τα πτηνά είναι πιο απομακρυσμένα. Αντίθετα, οφείλεται μάλλον στον τρόπο με τον οποίο προσανατολίζονται για να διατηρούν την τροχιά τους χωρίς να συγκρούονται μεταξύ τους.

Κάτι καινούργιο

Αυτό το χαρακτηριστικό της θέσης των ψαρονιών μάς επέτρεψε να καταλήξουμε σε ένα πραγματικά απροσδόκητο αποτέλεσμα: η μεταξύ τους αλληλεπίδραση δεν εξαρτάται τόσο από την απόσταση που έχουν ανάμεσά τους, όσο από τη σύνδεση μεταξύ των πιο κοντινών πτηνών. Φαίνεται πολύ φυσικό: αν τρέχω μαζί με φίλους και στρίψω δεξιά για να τους ακολουθήσω, η προσοχή μου επικεντρώνεται σε εκείνον που βρίσκεται πιο κοντά μου (είτε αυτός απέχει ένα είτε δύο μέτρα από εμένα) και δεν με ενδιαφέρει καθόλου τι κάνουν όσοι τρέχουν πιο μακριά. Εκ των υστέρων, το συμπέρασμα μοιάζει αρκετά προφανές· ωστόσο, στη φυσική και στα μαθηματικά είναι εντυπωσιακή η δυσαναλογία μεταξύ της προσπάθειας να κατανοήσουμε κάτι καινούργιο για πρώτη φορά και της απλότητας και της φυσικότητας του αποτελέσματος μόλις ολοκληρωθούν τα διάφορα επιμέρους βήματα. Στο τελικό προϊόν, είτε μιλάμε για τις επιστήμες είτε για την ποίηση, δεν υπάρχει ίχνος ούτε του κόπου που καταβάλλεται κατά τη διάρκεια της δημιουργικής διαδικασίας, αλλά ούτε των αμφιβολιών και των δισταγμών που συνοδεύουν αυτήν τη διαδικασία.

Από τον νόμο της παγκόσμιας βαρύτητας του Νεύτωνα κι έπειτα («η δύναμη της βαρύτητας ανάμεσα σε δύο σώματα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης»), η φυσική είναι συνηθισμένη σε αλληλεπιδράσεις που εξαρτώνται

από την απόσταση. Έτσι, δεν μας περνούσε από το μυαλό ότι η απόσταση θα μπορούσε να παίζει δευτερεύοντα ρόλο στον καθορισμό της δύναμης της αλληλεπίδρασης, έως ότου τα πειραματικά δεδομένα μάς το κατέστησαν πασιφανές.

Τι συνέβη, λοιπόν, στην περίπτωση μας; Κατ' αρχάς, εκφράσαμε ποσοτικά τις προηγούμενες παρατηρήσεις σχετικά με την τάση των πτηνών να τηρούν μεγαλύτερη «απόσταση ασφαλείας» από τους μπροστινούς συντρόφους τους σε σχέση με εκείνους στα πλάγια: με αυτό τον τρόπο ορίσαμε μια ποσότητα την οποία ονομάσαμε *ανισοτροπία* (στη φυσική, ένα μέγεθος είναι ανισότροπο αν έχει διαφορετικές τιμές σε διαφορετικές χωρικές κατευθύνσεις). Σε μια σειρά φωτογραφιών ενός συγκεκριμένου σμήνους, όταν μετρούσαμε την ανισοτροπία των ζευγών κοντινών πτηνών βρίσκαμε υψηλή τιμή, ενώ για τα απομακρυσμένα άτομα πτηνών η τιμή ήταν ουσιαστικά μηδενική. Ως εδώ ήμασταν ευχαριστημένοι: περιμέναμε ότι τα απομακρυσμένα πτηνά δεν θα είχαν πληροφορίες για τη θέση των άλλων και ήταν λογικό να μην υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις πλευρικές και τις πρόσθιες αποστάσεις.

Τα σοβαρά προβλήματα προέκυψαν όταν συγκρίναμε την ανισοτροπία μεταξύ πτηνών που βρίσκονταν στην ίδια απόσταση μεταξύ τους, την οποία μετρήσαμε σε διαφορετικές ακολουθίες φωτογραφιών. Τίποτα δεν έβγαζε νόημα: μερικές φορές η ανισοτροπία για πτηνά που είχαν μεταξύ τους απόσταση δύο μέτρων ήταν πολύ μεγάλη, ενώ σε άλλες ομάδες φωτογραφιών η ανισοτροπία στην ίδια απόσταση ήταν εντελώς αμελητέα· τα δεδομένα δεν έμοιαζαν να έχουν νόημα. Στο τέλος, συνειδητοποιήσαμε ότι η σύγκριση της συμπεριφοράς δύο πτηνών που βρίσκονται στην ίδια απόσταση σε διαφορετικά σμήνη δεν απέδιδε, επειδή η απόσταση μεταξύ των πλησιέστερων πτηνών μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σμήνος σε σμήνος.

Έτσι, λοιπόν, αλλάξαμε την οπτική μας γωνία: για κάθε πουλί ορίσαμε τον πρώτο του γείτονα, δηλαδή τον πλησιέστερο σύντροφό

του, έπειτα τον δεύτερο, στη συνέχεια τον τρίτο κ.ο.κ. Διαπιστώσαμε ότι η ανισοτροπία ήταν μεγάλη μεταξύ των πρώτων γειτόνων, μικρότερη μεταξύ των δεύτερων γειτόνων και ουσιαστικά μηδενιζόταν μεταξύ των έβδομων γειτόνων. Εκ πρώτης όψευς, θα έλεγε κανείς ότι δεν αντλήσαμε περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση: η ανισοτροπία μειώνεται με την απόσταση. Ωστόσο, τα πράγματα αλλάζουν όταν συγκρίνουμε σμήνη: η ανισοτροπία ήταν η ίδια για τα ζεύγη των πρώτων γειτόνων από διαφορετικά σμήνη, παρόλο που η μέση απόσταση μεταξύ αυτών των ζευγών ήταν υπερδιπλάσια στο ένα σμήνος απ' ό,τι στο άλλο. Σε αυτό το σημείο δεν χρειάστηκε να καταβάλουμε ιδιαίτερη διανοητική προσπάθεια: τα δεδομένα μάς υποχρέωσαν να υποθέσουμε την ύπαρξη μιας αλληλεπίδρασης μεταξύ των πτηνών που δεν είχε να κάνει με την απόλυτη απόσταση των ζευγών, αλλά με τις σχετικές αναλογίες των αποστάσεων.

Αυτό ήταν το αποτέλεσμα της πρώτης μας εργασίας το 2008. Από τότε όμως κύλησε πολύ νερό στο αυλάκι. Η σύνθεση της ερευνητικής μας ομάδας άλλαξε, εγώ είχα αρχίσει να αφιερώνω όλο μου τον χρόνο στο γυαλί σπιν, ενώ ταυτόχρονα είχαμε εξασφαλίσει επιπλέον χρηματοδότηση, με αποτέλεσμα να έχουμε τη δυνατότητα να αγοράσουμε καινούργιο, πολύ πιο εξελιγμένο τεχνικό εξοπλισμό — στην αγορά είχαν ήδη κάνει την εμφάνισή τους φωτογραφικές μηχανές με ικανότητα λήψης έως και 160 καρέ το δευτερόλεπτο με ανάλυση 4 μεγκαπίξελ.

Τώρα πια έχουμε νέες ιδέες και καινούργιους αλγορίθμους. Αρκεί να αναφερθεί ότι πλέον είναι δυνατόν να προσδιορίζουμε με ακρίβεια μερικών εκατοστών του δευτερολέπτου τη στιγμή που το κάθε μεμονωμένο πτηνό αρχίζει να στρέφεται όταν το σμήνος στο σύνολό του εκτελεί στροφή. Σχεδόν πάντα, μια μικρή ομάδα που βρίσκεται στη μία πλευρά αρχίζει να στρίβει και μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα —μερικά δέκατα του δευτερολέπτου για τα μικρά σμήνη και ένα ολόκληρο δευτερόλεπτο για τα μεγάλα— ακολουθούν όλα

τα άτομα του σμήνους. Ύστερα από εκτενή ανάλυση των δεδομένων και λεπτομερείς θεωρητικούς υπολογισμούς, καταλάβαμε ότι η ποσοτική συμπεριφορά ενός σμήνους, ακόμη και κατά τη διάρκεια μιας στροφής, μπορεί να γίνει κατανοητή με μεγάλη ακρίβεια: τα πτηνά ακολουθούν απλούς κανόνες, τους οποίους ανασυνθέσαμε χάρη στις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε, και κινούνται προσαρμολοζόμενα στη θέση των γειτόνων τους. Η πληροφορία για τη στροφή μεταφέρεται γρήγορα από το ένα πτηνό στο άλλο, σαν είδηση που διαδίδεται γοργά από στόμα σε στόμα.

Η έρευνά μας άλλαξε εντελώς το παράδειγμα που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε στις μελέτες που αφορούσαν τα σμήνη, τις αγέλες και τα κοπάδια. Πράγματι, πριν από την εργασία μας θεωρούνταν δεδομένο ότι η αλληλεπίδραση είχε να κάνει με την απόσταση. Εμείς διαπιστώσαμε ότι τα πουλιά επηρεάζονταν με τον ίδιο τρόπο από τα πλησιέστερα πουλιά, είτε αυτά βρίσκονταν σε απόσταση ενός μέτρου είτε δύο. Από την εργασία μας κι έπειτα, ωστόσο, είναι απαραίτητο να θεωρούμε ότι η αλληλεπίδραση συμβαίνει πάντα με τους πιο κοντινούς γείτονες. Αλλά ίσως το πιο ενδιαφέρον αποτέλεσμα ήταν η απτή απόδειξη πως μπορούμε να επισημαίνουμε ταυτόχρονα τη θέση χιλιάδων πτηνών και από αυτήν τη γνώση να εξάγουμε χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση της συμπεριφοράς των ζώων.

Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα ήταν εφικτά επειδή χρησιμοποιήσαμε ποσοτικές τεχνικές για τη στατιστική μελέτη της συμπεριφοράς μιας πολύ μεγάλης ομάδας ζώων. Με τούτο τον τρόπο, θέσαμε καινούργια πρότυπα έρευνας χρησιμοποιώντας στη βιολογία τεχνικές που γεννήθηκαν και αναπτύχθηκαν από τη στατιστική φυσική για την επίλυση πολύπλοκων και αταξινόμητων προβλημάτων. Ωστόσο, δεν εκτίμησαν όλοι οι βιολόγοι αυτή την εισβολή μας στον χώρο τους: κάποιοι έδειξαν μεγάλο ενδιαφέρον για το αποτέλεσμα ενώ άλλοι βρήκαν την έρευνά μας πολύ φτωχή ως προς τη βιολογία και υπερβολικά πλούσια ως προς τα

μαθηματικά. Έτσι, η εργασία μας απορρίφθηκε από διάφορα περιοδικά που πιθανότατα εκ των υστέρων το μετάνιωσαν: μετά τη μεγάλη επιτυχία του πρώτου μας άρθρου, που σήμερα αναφέρεται σε περίπου δύο χιλιάδες επιστημονικές δημοσιεύσεις, επακολούθησαν πολλές άλλες παρεμφερείς εργασίες.

Η βιολογία διανύει μια περίοδο μεγάλων αλλαγών: η γνώση ενός υπέρμετρα αυξανόμενου αριθμού δεδομένων καθιστά τη χρήση ποσοτικών μεθόδων όχι μόνο δυνατή αλλά και απαραίτητη. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πρόσφορο ή μη τρόπο, ανάλογα με το εκάστοτε πλαίσιο αναφοράς. Ιδιαίτερα στην ηθολογία, δηλαδή τη μελέτη της συμπεριφοράς των ζώων, τα υπερβολικά πολλά μαθηματικά μπορούν εύκολα να οδηγήσουν σε αρνητικές αντιδράσεις. Πράγματι, οι ηθολόγοι αναζητούν τους λόγους που κρύβονται πίσω από ορισμένες συμπεριφορές, ενώ θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί ότι οι ποσοτικές μέθοδοι είναι καθαρά περιγραφικές και επομένως δεν αγγίζουν την καρδιά της ηθολογικής έρευνας.

Παρ' όλα αυτά, το πνεύμα πολλών επιστημονικών κλάδων έχει αλλάξει με το πέρασμα των ετών· όμως τούτο συνέβη μέσα από έντονες συζητήσεις σχετικά με το ποιες μεθοδολογίες είναι επιστημονικές και σημαντικές, και ποιες, αντίθετα, θα πρέπει να απορριφθούν ως ακατάλληλες να απαντήσουν στα πραγματικά ερωτήματα του σχετικού ερευνητικού πεδίου. Ως προς αυτό, μας έρχονται στον νου τα κυνικά λόγια του σπουδαίου Μαξ Πλανκ, του θεμελιωτή της κβαντομηχανικής: «Μια νέα επιστημονική αλήθεια δεν θριαμβεύει επειδή οι πολέμοί της πείθονται και βλέπουν το φως, αλλά μάλλον επειδή στο τέλος πεθαίνουν και στη θέση τους διαμορφώνεται μια καινούργια γενιά που αποκτά εξοικείωση με τις καινούργιες έννοιες». Εγώ είμαι πιο αισιόδοξος από τον Πλανκ: πιστεύω ότι με καλή θέληση και με πολλή υπομονή μπορεί κανείς —τουλάχιστον στην πλειονότητα των περιπτώσεων— να καταλήξει σε κοινά συμπεράσματα ή, έστω, να αποσαφηνίσει τα επιμέρους σημεία της διαφωνίας.