

ΓΕΝΕΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗ ΣΕ ΚΑΘΟΛΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ*

ΣΠΥΡΟΣ ΑΡΤΑΒΑΝΗΣ-ΤΣΑΚΩΝΑΣ

Η βιολογία είναι η φυσική επιστήμη της οποίας το αντικείμενο προσεγγίζει από μια συγκεκριμένη σκοπιά περισσότερο από κάθε άλλη επιστήμη την ανάλυση της ανθρώπινης ύπαρξης. Υπόσχεται να αντιμετωπίσει τα γηρατειά και τις αρρώστιες, να εξαλείψει την πείνα, και ίσως ακόμα να φτάσει κοντά σε ό,τι οι αρχαίοι ονόμαζαν «πνεύμα». Είναι ο συνδυασμός των λύσεων σε πανάρχαιες ελπίδες και αρχέγονους φόβους, που θέτουν τη Βιολογία τόσο κοντά μας.

Η βιολογία σαν γνωστικό αντικείμενο σήμερα

Η βιολογία είναι κατ' εξοχήν πειραματική επιστήμη και δεν μπορεί να θεωρηθεί ακριβής όπως η φυσική και τα μαθηματικά. Τα αντικείμενα της βιολογικής έρευνας είναι αρκετά πολύπλοκα, και δεν είναι κλειστά ως συστήματα για να περιγραφούν με γενικές θεωρίες. Σήμερα όμως, όλοι αντιλαμβανόμαστε ότι βρισκόμαστε σε μια περίοδο μεθοδολογικής και επιστημολογικής σύνθεσης στις βιολογικές επιστήμες.

Η τεχνολογική πρόοδος στις δυο τελευταίες δεκαετίες μας έδωσε καινούριες δυνατότητες ανάλυσης του βιολογικού κόσμου καθώς και μια άνευ προηγουμένου ποσότητα πληροφοριών, πραγματικά προκαλώντας την μέχρι σήμερα πειραματική και ακαδημαϊκή μας πρακτική. Η επανάσταση της γονιδιωματικής της προηγούμενης δεκαετίας μας δίνει επιτέλους τη δυνατότητα να μελετήσουμε οργανισμούς σαν ολοκληρωμένα συστήματα. Είναι η πρώτη φορά που έχουμε βάσιμες ελπίδες να μην περιοριστούμε στα ερωτήματα που σχετίζονται με το πώς είναι χτισμένο ένα σύστημα και να προχωρήσουμε σε ερωτήματα που αναφέρονται στο γιατί είναι φτιαγμένο όπως είναι.

Η θέση που αναπτύσσω και υποστηρίζω βασίζεται σε αυτό που πιστεύω ότι αποτελεί την πιο σημαντική γενίκευση που αναδύεται από τις βιολογικές μελέτες των περασμένων πενήντα χρόνων. Συγκεκριμένα, ότι οι βασικές κυτταρικές λειτουργίες και βιοχημικοί μηχανισμοί συντηρούνται ανάμεσα στα διάφορα είδη. Η πειραματική δουλειά πάνω στην οποία βασίζεται αυτό το σημαντικότερο συμπέρασμα έγινε ως επί το πλείστον πάνω σε σχετικά απλά βιολογικά μοντέλα όπως βακτηρίδια, μύγες, σκώληκες κτλ. Αυτά είναι τα βιολογικά μοντέλα που αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της αναπτυξιακής βιολογίας και της γενετικής, των δύο αυτών αναπόσπαστων σήμερα κλάδων της βιολογίας.

Θα προσπαθήσω να εξηγήσω γιατί και πώς η ανάλυση ενός σχετικά απλού οργανισμού όπως η μύγα, η οποία είναι το πιο βασικό εργαλείο της δικιάς μου έρευνας και που προσφέρεται για πολύπλοκες γενετικές αναλύσεις, μπορεί να αποσαφηνίσει βασικές αρχές που διέπουν τα βιολογικά συστήματα και ως εκ τούτου να διαλευκάνει καθολικές βιολογικές έννοιες που αναφέρονται ακόμα και στην ανθρώπινη βιολογία και παθοφυσιολογία.

Ιστορικό αναπτυξιακής βιολογίας

Θα μου επιτρέψετε να περιγράψω το γνωστικό αντικείμενο της αναπτυξιακής βιολογίας και της γενετικής και να θέσω τις προόδους αυτών των κλάδων σε ένα σύντομο ιστορικό πλαίσιο. Το παρελθόν στη βιολογία, δεν προσφέρει μόνο τη γνώση τού τι έχει ήδη συμβεί αλλά είναι χρήσιμο για την αξιολόγηση των σύγχρονων αντιλήψεων.

Ο Σπύρος Αρταβάνης-Τσάκωνας

είναι καθηγητής στην έδρα
Isselbacher/ Peter D. Schwartz

- ✓ Κυτταρικής Βιολογίας στην Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Harvard και κατέχει την έδρα Αναπτυξιακής και Γενετικής Βιολογίας στο Collège de France.

* Το κείμενο αυτό αποτελεί προσαρμοσμένη εκδοχή της ομιλίας του Σπύρου Αρταβάνη-Τσάκωνα στην Ακαδημία Αθηνών στην τελετή ανακήρυξης του ως αντεπιστέλλοντος μέλους.

Η αναπτυξιακή βιολογία, ή εμβρυολογία όπως επίσης ονομάζεται, είναι η επιστήμη που προσπαθεί να κατανοήσει το πώς το γονιμοποιημένο ωάριο εξελίσσεται από ένα μοναδικό κύτταρο σε ένα πολυκύτταρο, πολύπλοκο οργανισμό. Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία πως ο πρώτος αναπτυξιακός βιολόγος ήταν ο Αριστοτέλης.

Η βιολογία όμως του Αριστοτέλη ήταν τελεολογική και κατά συνέπεια η προσωκρατική σκέψη είναι πλησιέστερη στις σημερινές αντιλήψεις και στο Δαρβίνο του 19ου μ.Χ. αιώνα απ' ότι αυτή του Αριστοτέλη. Οι προσωκρατικοί φιλόσοφοι, σχεδόν πρότειναν τη «φυσική επιλογή». Η άποψη, φερ' ειπείν ότι τα δόντια προέκυψαν τυχαία και παρέμειναν καθώς πρόσδιδαν στον οργανισμό που τα έφερε τη δυνατότητα αποτελεσματικότερης θρέψης, είναι εξαιρετικά διαφωτιστική κάτω από μια μοντέρνα οπτική γωνία: *ταῦτα μὲν ἐσώθη ἀπὸ τοῦ αὐτομάτου συστάντα ἐπιτηδείως*, όπως ισχυρίζονταν οι Προσωκρατικοί, εισάγοντας επίσης με αυτή τους τη φράση την έννοια της τύχης και της αναγκαιότητας, δύο έννοιες που υιοθετήθηκαν και αναλύθηκαν διεξοδικά από τον Jacques Monod στο διάσημο ομότιτλο βιβλίο του.

Η τελεολογική προσέγγιση, που απορρίπτεται σήμερα, αναπτύχθηκε σε αντιπαράθεση με την προσωκρατική θέση του «αυτομάτου», του τυχαίου με αλλά λόγια, σαν αρχή που βρίσκεται στη βάση της δημιουργία νέων τύπων. Επιχειρηματολογώντας ενάντια στους προδρόμους του, ο Αριστοτέλης ανέπτυξε τις επιστημονικές αρχές της πειραματικής μεθοδολογίας. Ακόμα και αν τα συμπεράσματά του, και συγκεκριμένα η τελεολογία του, δεν είναι αποδεκτά, η μεθοδολογία του και οι παρατηρήσεις του παραμένουν αξιοθαύμαστες και ως ένα μεγάλο βαθμό ακριβείς.

Η ελληνική περίοδος της βιολογικής σκέψης σταματά με το Γαληνό, ενώ ακολουθούν περισσότεροι από οκτώ αιώνες σιωπής μέχρι τον Leonardo da Vinci. Η αριστοτελική επιστημονική άποψη, όμως, απεδείχθη ιδιαίτερα ισχυρή και κυριάρχησε ως και τον 18ο αιώνα μέχρι να αμφισβητηθεί από τον Διαφωτισμό. Η καρτεσιανή σκέψη ξαναφέρει στο προσκήνιο αντιλήψεις που βρίσκονται κοντά στους Προσωκρατικούς, προτείνοντας ότι οι αρχές που διέπουν την λειτουργία των έμβιων οργανισμών δεν διαφέρουν από τις αρχές που διέπουν τα αντικείμενα.

Η ιδέα όμως ότι οι ίδιοι φυσικοί νόμοι βρίσκουν εφαρμογή τόσο στην ανόργανη ύλη, όσο και στους έμβιους οργανισμούς, καθώς και η προέκταση αυτής της αντίληψης ότι ακόμα και νοητικές καταστάσεις μπορούν να ερμηνευθούν με βάση φυσικά φαινόμενα ήταν ασύλληπτη και βλάσφημη, πυροδοτώντας τη διαμάχη μεταξύ των διαφόρων υλιστικών και βιταλιστικών κινημάτων, διαμάχη που τουλάχιστον για μερικούς δεν έχει επιλυθεί ακόμα και μέχρι σήμερα!

Ο 19ος αιώνας γνώρισε μία πραγματική επανάσταση στη βιολογία. Οι βιολογικές επαναστάσεις δεν βασίζονται μόνο στην διαμόρφωση καινούργιων εννοιών και υποθέσεων αλλά συχνότερα ίσως βασίζονται σε τεχνολογικές και μεθοδολογικές προόδους. Το 19ο αιώνα εμφανίζονται κατ' αρχήν μικροσκόπια που έχουν τη δυνατότητα να αναλύουν ιστούς σε κυτταρικό επίπεδο, και κατά δεύτερο λόγο και-

νούργιες βιολογικές έννοιες που θα αλλάξουν οριστικά την εικόνα μας για το ζωικό και φυτικό βασίλειο.

Γύρω στο 1850, η κυτταρική θεωρία βασισμένη στην ανάλυση ιστών μέσω του μικροσκοπίου διατυπώνεται από τον Theodor Schwann. Η θεωρία αυτή αποτελεί ίσως και την πρώτη κυριολεκτικά καθολική αρχή της βιολογικής επιστήμης, καθώς αναγνωρίζει σε όλα τα φυτά και τα ζώα, άσχετα με τις τεράστιες διαφορές στην εξωτερική τους μορφολογία, το κύτταρο σαν το βασικό δομικό τους λίθο.

Ο Theodor Schwan συγκεκριμένα αναφέρει ότι «όλοι οι οργανισμοί απαρτίζονται από όμοια μέρη, δηλαδή από κύτταρα. Αυτά τα κύτταρα συγκροτούνται και αναπτύσσονται σύμφωνα με κοινές αρχές. Επομένως, οι μηχανισμοί που διέπουν τη συμπεριφορά των κύτταρων είναι πάντοτε το αποτέλεσμα των ίδιων φυσικών δυνάμεων».

Αυτό αποτελεί μια εξαιρετικής σημασίας αρχή μια και συνεπάγεται την ύπαρξη βασικών, κοινών βιολογικών μηχανισμών που διαπερνούν τους φραγμούς ανάμεσα στα είδη. Η πλήρης αποδοχή της λειτουργικής αυτής διατήρησης, που κατά την άποψή μου αποτελεί ίσως και την πλέον προωθημένη προσφορά της βιολογίας, θα καθυστερούσε περισσότερο από έναν αιώνα, μέχρι την ανάπτυξη της μοριακής γενετικής.

Κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα ο Δαρβίνος διατύπωσε τη θεωρία της φυσικής επιλογής προτείνοντας ένα γενικότερο μηχανισμό που μπορούσε να ερμηνεύσει την εξέλιξη των ειδών, ενώ ο Μέντελ διατύπωσε τις βασικές αρχές της κληρονομικότητας. Οι θεωρίες του Δαρβίνου γίνονται αμέσως αντιληπτές από την επιστημονική κοινότητα ενώ ο Μέντελ παραμένει εντελώς άγνωστος μέχρι τις αρχές του 20ού αιώνα.

Πειραματική εμβρυολογία και γενετική

Στο τέλος το 19ου αιώνα ακριβείς περιγραφικές εμβρυολογικές μελέτες καταφέρνουν να αποδείξουν την κατά βάση αριστοτελική υπόθεση της *επιγένεσης*, σύμφωνα με την οποία το έμβρυο αναπτύσσεται διαδοχικά από την ουσιαστικά άμορφη μάζα του γονιμοποιημένου ωαρίου. Υπόθεση αντίθετη με την θεωρία του προσχηματισμού που υποστήριζε ότι το έμβρυο προϋπάρχει σε πλήρως ανεπτυγμένη αλλά μικροσκοπική μορφή, είτε μέσα στο σπέρμα είτε μέσα στο ωάριο. Κατά την εμβρυακή ανάπτυξη αυτή η μικροσκοπική μορφή απλά αναπτύσσεται. Η έρευνα όμως για μηχανισμούς που διέπουν την ανάπτυξη, δεν μπορούσε πλέον να αρκестεί σε περιγραφικές μελέτες και έπρεπε να γίνουν πειράματα.

Φτάνουμε έτσι στην αυγή του 20ού αιώνα και στην μετάπτωση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων της εμβρυολογίας. Η εμβρυολογία από περιγραφική γίνεται πειραματική και εισέρχεται σε νέα εποχή με την εισαγωγή των πειραμάτων μεταμόσχευσης. Ο Μέντελ ανακαλύπτεται εκ νέου το 1900 και ο Thomas Hunt Morgan με τους μαθητές του στο Πανεπιστήμιο Columbia της Νέας Υόρκης καθιερώνουν τη

μύγα *Drosophila melanogaster* σαν ένα γενετικό μοντέλο και ουσιαστικά καθιερώνουν την γενετική σαν επιστημονικό κλάδο. Βασιζόμενος ο Morgan στους νόμους του Μέντελ διατυπώνει την λεγόμενη θεωρία του γονιδίου, η οποία αντίθετα με τις θεωρίες της βιολογίας που είναι πιθανολογικού χαρακτήρα, παρέχει τη δυνατότητα της πρόβλεψης.

Από το 1900 μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '40, η πειραματική εμβρυολογία άνθισε θέτοντας τις βάσεις για πολλές από τις κυτταρικές αντιλήψεις που θεωρούμε ορθές μέχρι σήμερα οριοθετώντας και πολλά από τα προβλήματα που μας απασχολούν ακόμα. Παράλληλα η γενετική εξελίσσεται, αλλά χωρίς να επικοινωνεί σχεδόν καθόλου με την εμβρυολογία. Το πώς όμως οι μονάδες της κληρονομικότητας, τα γονίδια, σχετίζονται με την ανάπτυξη ενός οργανισμού παραμένει άγνωστο.

Οι εμβρυολόγοι σε όλο αυτό το διάστημα δεν έπαυαν να είναι ιδιαίτερα επιφυλακτικοί ως προς την σχέση που πιθανόν να συνδέει τα γονίδια και την εμβρυϊκή ανάπτυξη. Η κρατούσα άποψη στους κύκλους των εμβρυολόγων ήταν ότι τα γονίδια που μελετούσαν οι γενετιστές δεν είχαν να κάνουν τίποτα με την εμβρυογένεση και ότι οι φαινότυποι που παρατηρούνταν και αναλύονταν σχετίζονταν μόνο με φαινόμενα που είχαν σχέση με την τελική μόνο διαφοροποίηση του οργανισμού, και όχι με το πώς ο οργανισμός διαμορφώνεται.

Κατά συνέπεια, έως ότου οι γενετιστές καταφέρουν να συσχετίσουν σαφώς μεταλλαγμένα γονίδια με συγκεκριμένους εμβρυϊκούς φαινοτύπους και να εξηγήσουν την κυτταρική διαφοροποίηση, πώς δηλαδή ένα και το αυτό χρωμόσωμα, ένα και το αυτό γονιδίωμα θα λέγαμε σήμερα, μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικούς κυτταρικούς τύπους, δεν υπήρχε λόγος να ασχολείται η εμβρυολογία με τη λειτουργία των γονιδίων.

Ο Morgan που είχε ξεκινήσει την επιστημονική του καριέρα σαν εμβρυολόγος, ορθά διέβλεψε ότι τα γονίδια θα πρέπει να παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη, δεν ήταν όμως σε θέση να συσχετίσει τη λειτουργία των γονιδίων με την εμβρυϊκή ανάπτυξη. Κάποια λίγα δεδομένα που συσχέτιζαν την λειτουργία κάποιου γονιδίου με θνησιγενείς φαινοτύπους κατά την εμβρυογένεση, άρχισαν να εμφανίζονται δειλά κατά την δεκαετία του '30, έπρεπε όμως να περάσουν άλλα 40 χρόνια μέχρι να αποδειχθεί χωρίς πια καμία αμφιβολία ότι η μορφογένεση στην ανάπτυξη ενός οργανισμού καθοδηγείται από το γονιδίωμα, και συγκεκριμένες λειτουργίες οφείλονται σε συγκεκριμένα γονίδια.

Αυτά τα επόμενα 40 χρόνια πάντως σφραγίστηκαν από αυτό που σήμερα ονομάζουμε επανάσταση της μοριακής βιολογίας. Η ανακάλυψη από τον Avery και τους συνεργάτες του ότι τα γονίδια συντίθενται από DNA σηματοδότησε την απαρχή αυτής της επανάστασης στις αρχές της δεκαετίας του '40. Το 1953 οι Watson and Crick διαλεύκαναν τη δομή του DNA η οποία εξηγούσε πώς τα γονίδια διπλασιάζονται κατά την κυτταρική διαίρεση παρέχοντας έτσι και ένα μοριακό μηχανισμό για την κληρονομικότητα. Η γένεση της μοριακής βιολογίας και η έκρηξη της ερευνητικής δρα-

στηριότητας που ακολούθησε παραμέρισε την εμβρυολογία και τη γενετική από το προσκήνιο.

Στο τέλος της δεκαετίας του '60 είχαν τεθεί οι μοριακές βάσεις της κυτταρικής φυσιολογίας. Ξέρουμε πλέον πως οι γενετικές πληροφορίες εναποθηκευμένες στις αλληλουχίες νουκλεοτιδίων του DNA τελικά μεταφράζονται σε συγκεκριμένες πρωτεΐνες και ξέρουμε πως έξω-κυτταρικά μοριακά σήματα μπορούν να ελέγχουν την λειτουργία συγκεκριμένων γονιδίων. Επί τέλους μπορούμε να εξηγήσουμε πώς ένα πανομοιότυπο γονιδίωμα μπορεί να διαφοροποιείται λειτουργικά ανάλογα με τα σήματα που δέχεται από το κυτταρικό περιβάλλον. Το πρόβλημα της κυτταρικής διαφοροποίησης, που είχε τεθεί από τον προηγούμενο αιώνα, έχει θεωρητικά τουλάχιστον λυθεί.

Ακόμα και με την εφαρμογή της μοριακής βιολογίας, ωστόσο, η σύνδεση γενετικής και εμβρυολογίας δεν ήταν δυνατή καθώς απουσίαζαν οι μέθοδοι που θα επέτρεπαν την απομόνωση και μελέτη συγκεκριμένων γονιδίων σε βιοχημικό επίπεδο. Και πάλι μια μεθοδολογική ανακάλυψη έλυσε το πρόβλημα. Μια ερευνητική ομάδα στο Stanford, στις αρχές της δεκαετίας του '70, ανακάλυψε την τεχνολογία του ανασυνδυασμένου DNA, ανοίγοντας τους δρόμους της γενετικής μηχανικής και επιτρέποντας την απομόνωση κάθε γονιδίου σε ποσότητες που επιτρέπουν τη βιοχημική ανάλυση. Η στιγμή της μοριακής ανάλυσης της οντογένεσης είχε πλησιάσει.

Η τεχνολογία του ανασυνδυασμένου DNA είχε τεράστια επίδραση στην πειραματική βιολογία. Για πρώτη φορά ήταν δυνατό να μελετήσουμε βιοχημικά τα επιμέρους γονίδια και να αναλύσουμε σε μοριακό πλέον επίπεδο τις ομοιότητες και διαφορές ανάμεσα σε γονίδια απομονωμένα από διαφορετικά είδη.

Αναπτυξιακή γενετική

Φτάνουμε στο τέλος της δεκαετίας του '70, όταν η Christiane Nüsslein-Volhard και ο Eric Wieschaus πραγματοποίησαν τη γενετική ανάλυση της ανάπτυξης χρησιμοποιώντας τη μύγα του Morgan, τη *Drosophila melanogaster*. Την εποχή αυτή πλέον η Δροσόφιλα αποτελούσε ένα ενδεδειγμένο πειραματικό μοντέλο που είχε πίσω του 60 χρόνια γενετικής ανάλυσης.

Εκείνο που έκαναν αυτοί οι ερευνητές ήταν να κορέσουν το γονιδίωμα της μύγας αυτής με μεταλλάξεις σε κάθε γονίδιο και να προσδιορίσουν αυτά που προκαλούσαν διαρθρωτικές αλλαγές στην μορφογένεση του εμβρύου. Το αποτέλεσμα ήταν σχετικά απλό και προσδιόρισε μια ομάδα γονιδίων που λειτουργούν συγχρονισμένα για να χτίσουν από ένα άμορφο μονοκυτταρικό ωάριο έναν οργανισμό, ο οποίος αποτελείται από εκατομμύρια κύτταρα τοποθετημένα με ακρίβεια, ορίζοντας έτσι έναν τρισδιάστατο οργανισμό. Η αναπτυξιακή λογική που υπόκειται της μορφογένεσης είχε αποκαλυφθεί.

Η γέφυρα ανάμεσα στη γενετική και την αναπτυξιακή

βιολογία είχε επί τέλους δημιουργηθεί. Η ενδελέχεια των βιταλιστών του 19ου αιώνα και του Αριστοτέλη δεν ήταν πλέον μυστήριο.

Συγκριτικές αναλύσεις

Οι συγκριτικές μοριακές μελέτες ανάμεσα στα γονίδια της μύγας και σε αυτά των θηλαστικών συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου αποκάλυψαν ένα βαθμό εξελικτικής συντήρησης που ξεπερνούσε και τα πιο τολμηρά όνειρα όσων από μας υποστηρίζαμε με θέρμη τον αφορισμό που αποδίδεται στο Jacques Monod : «ό,τι ισχύει για το βακτηρίδιο *E.coli* ισχύει και για τον ελέφαντα».

Οι μοριακές μελέτες έδειξαν σαφώς ότι σχεδόν κάθε γονίδιο της μύγας έχει το ομόλογό του στον άνθρωπο. Πιο σημαντικό όμως ακόμα είναι το γεγονός ότι λειτουργικά τα γονίδια αυτά εκπληρώνουν τον ίδιο σκοπό. Σκεφτείτε πόσο εκπληκτικό είναι το γεγονός ότι η αλληλουχία των μοριακών συμβάντων που ορίζουν, παραδείγματος χάριν, τον πρόσθιο-οπίσθιο άξονα στις μύγες και στους ανθρώπους, δηλαδή οι κανόνες που ορίζουν ότι ο θώρακας βρίσκεται μεταξύ της κεφαλής και του κοιλιακού χώρου, είναι κοινά. Οι μηχανισμοί δηλαδή που διέπουν την ανάπτυξη, τη μορφογένεση και κατά πολύ την οργανογένεση της μύγας είναι οι ίδιοι που χτίζουν ένα θηλαστικό έμβρυο, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου. Το ίδιο γονίδιο που ρυθμίζει την ανάπτυξη του οφθαλμού στα θηλαστικά ρυθμίζει και την ανάπτυξη του ματιού της μύγας.

Χωρίς να υπεισέλθω σε πειραματικές λεπτομέρειες θα αναφερθώ, απλουστεύοντας βέβαια, μια σειρά πειραμάτων το οποία έχουν γίνει στο εργαστήριο του Gehring στη Βασιλεία και απεικονίζουν παραστατικά αυτές τις αρχές. Ας σκεφτούμε μια μύγα της οποίας το γονίδιο που είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη του ματιού έχει μια μετάλλαξη και δεν λειτουργεί, με αποτέλεσμα η μύγα να μην έχει καθόλου μάτια. Εάν τώρα χρησιμοποιώντας μεθόδους της γενετικής μηχανικής τοποθετήσουμε στο γονιδίωμα αυτής της μεταλλαγμένης μύγας το ομόλογο ανθρώπινο γονίδιο το οποίο ρυθμίζει την ανάπτυξη του ανθρώπινου οφθαλμού, τότε το γονίδιο από το θηλαστικό είναι σε θέση να λειτουργήσει στο νέο κυτταρικό περιβάλλον του και να αντικαταστήσει την γονιδιακή έλλειψη της μεταλλαγμένης μύγας, η οποία μπορεί πλέον να έχει κανονικά μάτια.

Είναι εντυπωσιακό και απρόσμενο ότι υπάρχει μια βιολογική ενότητα στην ανάπτυξη των μεταζώων που δεν θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή χωρίς την γενετική και μοριακή ανάλυση που μας προσέφερε η *Drosophila*, αυτό το σχετικά απλό γενετικό μοντέλο.

Γονιδιωματική (Genomics)

Χάρη στις τεχνικές προόδους της τελευταίας δεκαετίας έχουμε πια φτάσει σε ένα σημείο όπου μπορούμε να μελε-

τήσουμε ολόκληρο γονιδίωμα και όχι μόνο μεμονωμένα γονίδια. Η αλληλουχία και συνεπώς η γραμμική δομή ολόκληρων γονιδιωμάτων διάφορων ειδών συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου, είναι πλέον στην διάθεσή μας. Οι πληροφορίες αυτές, ενισχύουν την ιδέα της εκπληκτικής πραγματι ομοιότητας μεταξύ της γονιδιακής δομής και λειτουργίας του ανθρώπου και ασπόνδυλων οργανισμών όπως οι μύγες και οι σκώληκες. Υποδεικνύοντας για ακόμα μια φορά ότι απλά γενετικά μοντέλα μπορούν να μας διδάξουν πολλά για το πώς λειτουργούν εξελικτικά ανώτερα είδη.

Η μαζική «γονιδιωματική ανάλυση» αποτέλεσε πρόκληση για τις υπάρχουσες μεθοδολογίες, τις οποίες μπορούσαμε μέχρι σήμερα να χρησιμοποιήσουμε για να αναλύσουμε βιολογικά συστήματα. Οι μέθοδοι ανάλυσης ξεπερνούν πια τις κλασικές θα έλεγα βιολογικές προσεγγίσεις και αγγίζουν καινούργιους ορίζοντες: οι υπολογιστές, η κατασκευή μοντέλων (modelling) και η πληροφορική έχουν πια εισχωρήσει για τα καλά στην βιολογία. Ένας εντελώς καινούργιος τρόπος ανάλυσης και μια καινούργια γλώσσα ανάμεσα στους βιολόγους και τους μαθηματικούς έχει γεννηθεί.

Η μονάδα μελέτης στην πειραματική βιολογία μεταφέρεται από το γονίδιο στο γονιδίωμα παρασύροντας μαζί της την μεθοδολογική βάση της βιολογικής ανάλυσης. Σαν αποτέλεσμα, η έρευνα επεκτείνεται σε ένα επίπεδο πέρα από αυτό των μεμονωμένων πειραματικών συστημάτων παρέχοντας μας για πρώτη φορά τη δυνατότητα να δούμε μακρύτερα από τις τοπικές αλήθειες που εκ των πραγμάτων μπορούν μόνο να προσφέρουν οι μελέτες μεμονωμένων γονιδίων και πειραματικών συστημάτων. Έχουμε τη δυνατότητα να μελετήσουμε βιολογικά συστήματα σε ένα εντελώς νέο επίπεδο φέρνοντας πιο κοντά τα ερωτήματα της εξέλιξης στη μοριακή γενετική.

Οι συγκρίσεις γονιδιωμάτων μεταξύ απομακρυσμένων ειδών μπορούν να δώσουν πληροφορίες που θα ήταν αδιανόητες ακόμα και πριν από μερικά χρόνια, ενώ όλοι προσδοκούμε συγκρίσεις μεταξύ συγγενικών ειδών. Είναι περιττό να τονίσω τις δυνατότητες που προσφέρουν οι συγκρίσεις ανάμεσα, π.χ. στον άνθρωπο και τον πίθηκο. Δεν είναι δύσκολο να φανταστούμε ότι τέτοιες συγκρίσεις ίσως μας δώσουν κάποιες ενδείξεις σχετικά με τη βιολογική μας ύπαρξη, το βιολογικό μας *raison d'être*. Η γλώσσα και η σκέψη έχουν αναμφισβήτητα και βιολογική διάσταση που εμπίπτει στην περιοχή των ενδιαφερόντων όλων μας. Δεν ισχυρίζομαι ότι η σύγκριση θα δώσει οπωσδήποτε τέτοιου είδους απαντήσεις, αλλά δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι συγκρίσεις των γονιδιωμάτων συγγενικών ειδών θα γίνουν έχοντας αυτά τα ερωτήματα υπ' όψιν.

Σύνθετοι και απλοί οργανισμοί

Παρόλο που ο αφορισμός του Monod –όσα ισχύουν για το βακτηρίδιο *E.coli* ισχύουν και για τον ελέφαντα– έχει επαληθευτεί σε εκπληκτικό βαθμό, δεν χρειάζεται να είναι κα-

νείς βιολόγος για να αντιληφθεί πως ότι ισχύει για τον ελέφαντα δεν ισχύει για το βακτηρίδιο! Εφόσον όμως ο βαθμός ομοιότητας μεταξύ του ανθρώπινου γονιδιώματος και των οργανισμών-μοντέλων είναι μεγάλος η εύλογη ερώτηση είναι πώς επιτυγχάνεται η πολυπλοκότητα και η ιδιαιτερότητα ενός οργανισμού. Με άλλα λόγια, γιατί ο άνθρωπος είναι διαφορετικός από τη μύγα ενώ τα γονιδιώματά τους μοιάζουν τόσο πολύ. Βέβαια εδώ δεν αναζητώ μεταφυσικές αλλά φυσικές εξηγήσεις.

Αυτό που είναι ξεκάθαρο είναι ότι τόσο σε επίπεδο φυσικής εμφάνισης όσο και σε επίπεδο συμπεριφοράς τα χαρακτηριστικά αυτά δεν συσχετίζονται με ευθέως ανάλογο τρόπο με τον αριθμό των γονιδίων που βρίσκονται στο γονιδίωμα. Ξέρουμε πλέον ότι η βιολογική αιτία της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας του ανθρώπου συγκριτικά με την μύγα –για να χρησιμοποιήσω το ίδιο παράδειγμα– δεν είναι ένα αναλογικά περιπλοκότερο γονιδίωμα.

Οι άνθρωποι έχουν μόλις διπλάσιο αριθμό γονιδίων από τις μύγες και τους σκώληκες. Στον άνθρωπο, παρόλο που ο τρόπος με τον οποίο αναδιπλώνονται οι λειτουργικές και δομικές υπομονάδες που συνιστούν τις πρωτεΐνες, είναι κάπως πιο πολύπλοκος από αυτόν των ασπόνδυλων οργανισμών-μοντέλων, το 90% αυτών των υπομονάδων είναι εντελώς όμοιες. Ως εκ τούτου οι διαφορές μεταξύ των απλών και των πολυσύνθετων οργανισμών, η διάφορα της πολυπλοκότητας μεταξύ της μύγας και του ανθρώπου πρέπει να αναζητηθεί σε επίπεδο πέρα από τη σύγκριση του αριθμού γονιδίων στο γονιδίωμα.

Η πολυπλοκότητα είναι ένας όρος που μπορεί να γίνει κατανοητός διαισθητικά αλλά δεν είναι καθόλου εύκολο να ορισθεί με σαφήνεια. Είναι όρος που έχει απασχολήσει πολλούς θεωρητικούς οι οποίοι προσπάθησαν να τον ορίσουν να τον μελετήσουν – μεταξύ αυτών αξίζει να αναφερθούν ο Ιλία Πριγκοζίν και ο στενός του συνεργάτης Γρηγόρης Νίκολης. Δεν θα προσπαθήσω να αναλύσω τον ορισμό της πολυπλοκότητας, είναι όμως σημαντικό να αγγίξω τουλάχιστον το θέμα μια και είναι πιστεύω η πεμπτουσία της βιολογίας του σήμερα.

Αν θεωρήσουμε ότι ένας οργανισμός με συγκεκριμένο σχήμα, μέγεθος, χρόνο ζωής και συμπεριφορά είναι το αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε εκατομμύρια ανεξάρτητα κύτταρα, και ότι καθένα από αυτά είναι ένα πολυδιάστατο εργοστάσιο αποτελούμενο από δεκάδες χιλιάδες μόρια που με τη σειρά τους συμμετέχουν σε χιλιάδες χημικές αντιδράσεις, τότε όλοι θα συμφωνήσουμε ότι συζητάμε για ένα δικτυοειδές σύστημα που με θαυμαστό τρόπο καταφέρνει να συντονίζει όλα αυτά έλλογα.

Πώς αυτή η εξαίσια αρμονία επιτυγχάνεται αποτελεί κατ' εμέ τουλάχιστον ίσως το πιο σημαντικό ερώτημα της βιολογίας σήμερα. Όλη η επανάσταση της μοριακής γενετικής και της γονιδιωματικής ανάλυσης των τελευταίων ετών υπαινίσσεται την ύπαρξη γενικών νόμων που διέπουν την αρχιτεκτονική και τη λειτουργικότητα αυτής της πολυπλοκότητας. Οι νόμοι αυτοί πρέπει να ορίζουν το πώς φτάνουμε από μεμονωμένα γονίδια σε οργανισμούς. Δεν είναι τυ-

χαίο ότι δεν υπάρχουν οργανισμοί με σχετικά λίγα μόνο γονίδια, καθώς φαίνεται πως απαιτείται ένας ελάχιστος βαθμός πολυπλοκότητας για να επιτευχθεί αυτό που ονομάζουμε ζωή. Οι κανόνες που διέπουν τους έμβιους οργανισμούς σε αυτό το επίπεδο είναι εντελώς άγνωστοι, και θεωρητικές αναλύσεις του προβλήματος υπαινίσσονται εκπλήξεις, καινούργιους βιολογικούς κανόνες –όχι απαραίτητα αναγωγιστικούς– και κατά συνέπεια καινούργιες καθολικές βιολογικές έννοιες.

Θέλω να τονίσω ότι αυτά τα προβλήματα, τα οποία πλέον αρχίζουμε να αντιμετωπίζουμε με τις καινούριες τεχνικές της γονιδιωματικής που έχουμε στην διάθεση μας, δεν συνδέονται απλά και μόνο με θεωρητικές επιστημονικές γνώσεις αλλά έχουν προεκτάσεις στον τρόπο με τον οποίο είμαστε ικανοί να αντιληφθούμε το περιβάλλον μας και να κατανοήσουμε την κυτταρική φυσιολογία στην υγεία και την πάθηση. Οι εφαρμογές αυτών των γνώσεων είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη φαρμακολογία και γενικότερα την ιατρική.

Σχέσεις με την ιατρική

Επανερχόμενος στην πράγματι καθολική έννοια της συντήρησης της δομής και λειτουργίας των γονιδίων μεταξύ των ειδών, μπορούμε να πούμε πως αποτελεί ήδη ένα ομοιογενή φακό μέσω του οποίου μπορούμε να δούμε τον κόσμο των έμβιων όντων. Αυτή η ματιά έχει όχι μόνο μεθοδολογικές και επιστημολογικές, αλλά ακόμα και κοινωνικές επιπτώσεις.

Νοσήματα, όπως ο καρκίνος, διάφορες μορφές συμφορησης, μορφές της νόσου Alzheimer και πάρα πολλές άλλες, έχουν συσχετιστεί με μεταλλάξεις σε συγκεκριμένα γονίδια. Γενικά, οι μοριακές αναλύσεις έχουν δώσει έμφαση στο γενετικό υπόβαθρο των ασθενειών. Τονίζω όμως ότι απέχουμε πολύ ακόμα από το να κατανοήσουμε πώς οι περιβαλλοντικές παράμετροι επηρεάζουν τη γενετική ιδιοσυστασία. Αναφέρομαι σε αυτό μια και ακριβώς λόγω της συνειδητοποίησης της μεγάλης σημασίας της κληρονομικότητας –του γονιδιώματος δηλαδή– στη βιολογία μας, καλοθελητές έχουν προβάλει διάφορες ντετερμινιστικές ερμηνείες, προσφέροντας σαθρά επιστημονικά επιχειρήματα σε διάφορες μορφές ρατσισμού.

Είναι σημαντικό να έχουμε πάντα υπ' όψιν ότι η συσχέτιση γονότυπου/φαινότυπου είναι προσεγγιστική. Δεν μπορούμε με ακρίβεια να προσεγγίσουμε τη λειτουργία ενός φυσιολογικού γονιδίου από τη μεταλλαγμένη συμπεριφορά του. Κάποιες φορές αυτή η προσέγγιση λειτουργεί, άλλες όχι. Επιπλέον, αν θέλουμε να διορθώσουμε κάποια μετάλλαξη, ή, για να το θέσω διαφορετικά, να θεραπεύσουμε κάποια ασθένεια, το γονίδιο το οποίο έχει συσχετισθεί με την ασθένεια αυτή μπορεί να μην είναι ο καλύτερος στόχος.

Αναφερθήκαμε ήδη στο γεγονός ότι τα γονίδια μέσα στο κύτταρο ποτέ δεν λειτουργούν μόνα τους. Ένα μεμονωμένο γονίδιο αποτελεί μόνον ένα κρίκο μέσα σε ένα δί-

κτυο που ορίζεται από πολύπλοκες γονιδιακές διασυνδέσεις. Οι διασυνδέσεις αυτές καθ' αυτές είναι εκείνες που ορίζουν τις κυτταρικές λειτουργίες. Ως εκ ετούτου ένα γονίδιο το οποίο έχει συνδεθεί με μια ασθένεια δεν είναι απαραίτητα, θα έλεγα δε ότι σπάνια είναι, ο καλύτερος θεραπευτικός στόχος. Εάν όμως γνωρίζουμε το λειτουργικό δίκτυο μέσα στο οποίο το μεταλλαγμένο γονίδιο είναι ενταγμένο, οι πιθανότητες θεραπευτικής αγωγής αυξάνονται σημαντικά, μια και η διόρθωση κάποιας δυσλειτουργίας μπορεί να αντιμετωπιστεί στοχεύοντας στοιχεία στο δίκτυο και όχι απαραίτητα στοχεύοντας το συγκεκριμένο γονίδιο.

Ίσως ένα απλοϊκό παράδειγμα θα καταφέρει να σας δώσει μια πιο συγκεκριμένη εικόνα της σημασίας που μπορεί να έχει η γνώση της λειτουργικής σύνδεσης των γονιδίων. Φανταστείτε ένα τραπέζι που έχει χάσει τη σταθερότητα του μια και κάτι συνέβη και το ένα πόδι έγινε λίγο κοντύτερο από τα άλλα. Ένα τρόπος να διορθώσουμε το πρόβλημα είναι να βάλουμε ένα χαρτονάκι κάτω από το προβληματικό πόδι. Εάν όμως δεν έχουμε πρόχειρο χαρτί αλλά έχουμε πριόνι, ένας άλλος τρόπος να διορθώσουμε το πρόβλημα είναι να κοντύνουμε κατάλληλα τα άλλα τρία πόδια. Προϋπόθεση βέβαια στη δεύτερη... θεραπευτική λύση είναι η γνώση ότι τα τέσσερα πόδια είναι συνδεδεμένα λειτουργικά!

Το να μελετήσουμε το κύκλωμα και κατά συνέπεια να ορίσουμε τις λειτουργικές διασυνδέσεις των γονιδίων σε ένα κύτταρο δεν είναι εύκολη υπόθεση. Η καλύτερη και πλέον αποτελεσματική μέθοδος για να κάνουμε τέτοιες συσχετίσεις είναι μέσω γενετικής. Δυστυχώς όμως στον άνθρωπο και γενικότερα στα θηλαστικά ο κύκλος ζωής, το γονιδίωμα, καθώς και διάφορες άλλες παράμετροι καθιστούν αδύνατους τους γενετικούς πειραματισμούς που είναι απαραίτητοι για να ορίσουμε τα λειτουργικά κυκλώματα των γονιδίων.

Όμως, εάν οι μύγες και οι σκώληκες, πειραματικά μοντέλα που επιτρέπουν τέτοιου είδους γενετικές αναλύσεις, διαθέτουν το ίδιο γενετικό πλαίσιο με τον άνθρωπο, η μελέτη της λειτουργίας των γονιδίων στις μύγες μπορεί να λύσει προβλήματα σχετικά με την ανθρώπινη βιολογία. Ίσως λοιπόν να μην ξαφνιαστείτε εάν σας πω ότι περισσότερα από 60% των γονιδίων των ανθρώπων που έχουν συσχετιστεί άμεσα με νοσήματα έχουν ομόλογα στις μύγες.

Αρα βλέπουμε πως γενετικά μοντέλα όπως οι μύγες και οι σκώληκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό γονιδιακών κυκλωμάτων που έχουν άμεση σχέση με ανθρώπινα νοσήματα. Η διατήρηση γονιδιακών λειτουργιών ανάμεσα στα είδη μετέβαλε τα γενετικά αυτά πειραματικά μοντέλα από εσωτεριστικά αντικείμενα (esoteric) της γενετικής σε μοντέλα ανθρώπινων νόσων.

Αυτός ο σύνδεσμος που σχετικά πρόσφατα έγινε εφικτός άνοιξε ένα καινούργιο δρόμο που συνδέει τη βασική βιολογία και τη μοριακή γενετική με την ιατρική. Η σύνδεση είναι ακόμα απλοϊκή αλλά σας αφήνω να φαντασθείτε τις δυνατότητες που προσφέρονται. Πιστεύω ότι αυτός ο δρόμος έχει τεράστια σημασία για το μέλλον και υπόσχεται να

αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο μελετούμε και αντιμετωπίζουμε τις νόσους.

Το κοινωνικό πρόσωπο της βιολογίας

Ελπίζω στο σύντομο αυτό κείμενο να κατάφερα να δώσω μια μικρή ιδέα γιατί και πώς γενετικά πειραματικά μοντέλα έχουν καταλάβει κεντρική θέση στη βιολογία. Τα μοντέλα αυτά έχουν γίνει γέφυρες που επιτέλους επιτρέπουν στους βιολόγους την εξέταση και τον προσδιορισμό γενικών βιολογικών εννοιών. Ναι μεν μπορεί να μην καταφέραμε ποτέ να περιγράψουμε τη βιολογία με γενικές, μεγάλες, προγνωστικού τύπου θεωρίες, αλλά δεν υπάρχει νομίζω αμφιβολία ότι βρισκόμαστε σε μια εποχή που μας επιτρέπει να οραματιζόμαστε μια μεγάλη σύνθεση.

Καθώς η αναπτυξιακή βιολογία και η γενετική κατέχουν σήμερα κεντρικό ρόλο στη βιολογική έρευνα, κατ' επέκταση αντίστοιχος είναι και ο ρόλος τους στην καθημερινή ζωή. Σχεδόν κάθε εύρημα στη βιολογία έχει και ένα κοινωνικό πρόσωπο.

Επανερχόμενος στην αρχική διατύπωσή μου, η βιολογία βρίσκεται κοντά στην ανθρώπινη ύπαρξη, οι πρόοδοι που μόλις χτες πρόβαλλαν σαν επιστημονική φαντασία, σήμερα είναι πραγματικότητα. Οι βιολογικές επιστήμες εισέβαλαν στη ζωή μας με πρωτόφαντο τρόπο.

Οι ασθένειες αντιμετωπίζονται, ο θάνατος απομακρύνεται και οι μύθοι μας (οι φαντασιακές μας αξίες, δανειζόμενος μια έκφραση του μεγάλου στοχαστή Κορνήλιου Καστοριάδη) απειλούνται. Πιστεύω πως η πειραματική προσέγγιση, που συνιστά μεθοδολογικά τον ακρογωνιαίο λίθο της επιστήμης μου, έχει καθοριστικές προεκτάσεις. Προσπαθεί να απαντήσει σε θεμελιώδη ερωτήματα, που σε τελική ανάλυση αφορούν την καθημερινότητά μας ως προς τη φυσική της καθώς και –τολμώ να πω– την πνευματική όπως και την κοινωνική της διάσταση.

Οι δυνητικές προεκτάσεις της βιολογικής γνώσης είναι τόσο απτές που δεν είναι περίεργο ότι η κοινωνία μετασχηματίζεται χάρη σ' αυτήν. Είναι η σχέση του ατόμου με το κοινωνικό σύνολο, τα συστήματα υγείας, η ανάπτυξη και η διαθεσιμότητα φαρμάκων, η ανθρώπινη κλωνοποίηση, η επέκταση της ζωής, ο καθορισμός θεραπευτικών στρατηγικών στην ιατρική, και άλλα πολλά που επηρεάζονται από τη γνώση των βασικών αρχών, των καθολικών πορισμάτων της πειραματικής βιολογίας.

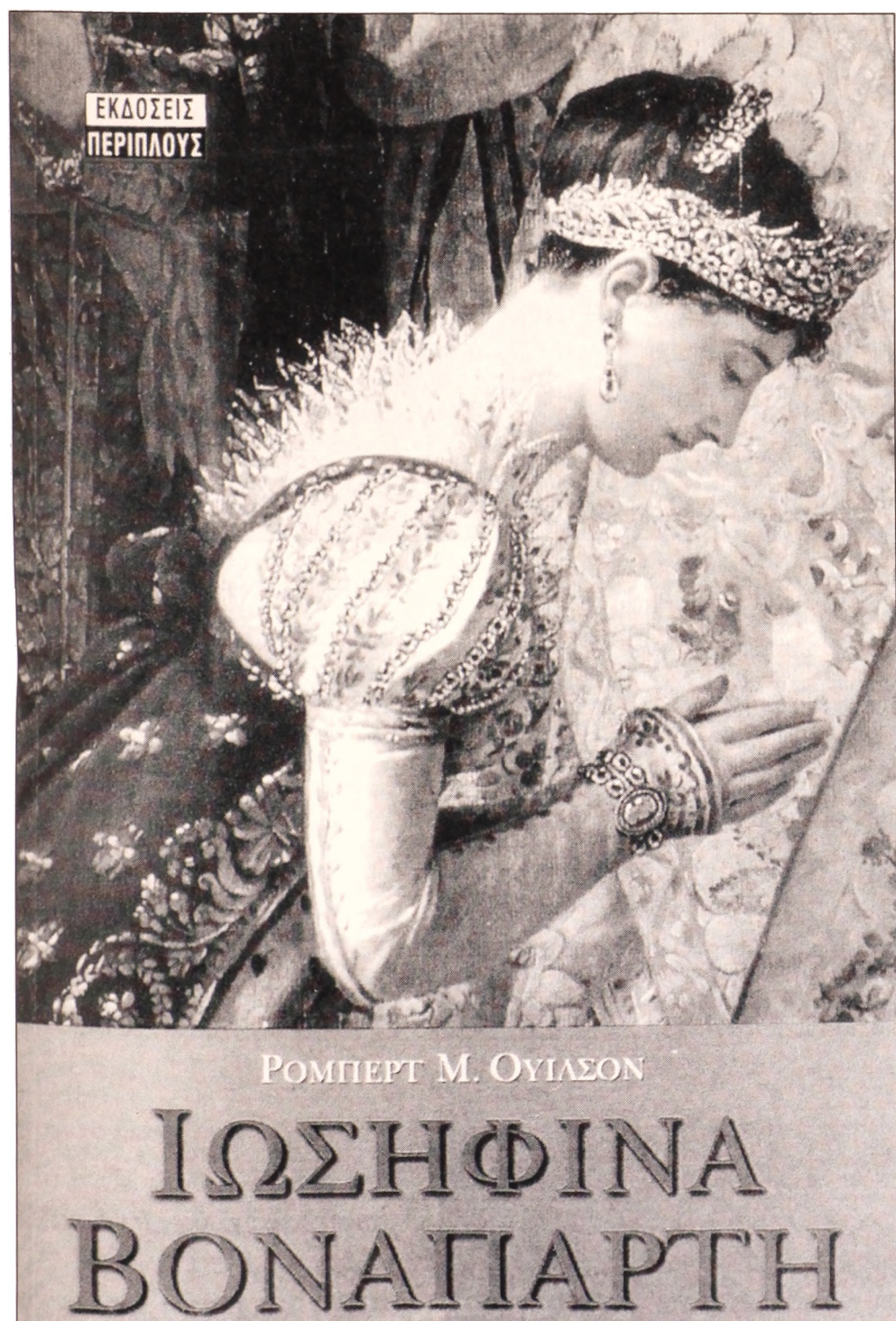
Όσο διευρύνονται οι βιολογικές μας γνώσεις, τόσο αναρωτιόμαστε για το εάν όντως χτίζουμε έναν καλύτερο κόσμο. Όπως έχω πολλές φορές υποστηρίξει, η απάντηση είναι καταφατική! Δεν πρέπει να υπάρχει όριο στην γνώση. Το γνώθι σ' αυτόν δεν είναι απλά μια διανοητική άσκηση αλλά, πιστεύω, υποχρέωση. Η γνώση, βέβαια, δεν έχει σύνορα αλλά ταυτόχρονα δεν έχει ούτε ηθική ούτε συναίσθημα, εν αντιθέσει με εμάς. Κατά συνέπεια η βιολογική γνώση μας προσφέρει δυνατότητες που μπορούμε είτε να χρησιμοποιήσουμε είτε να καταχραστούμε, κατά βούληση.

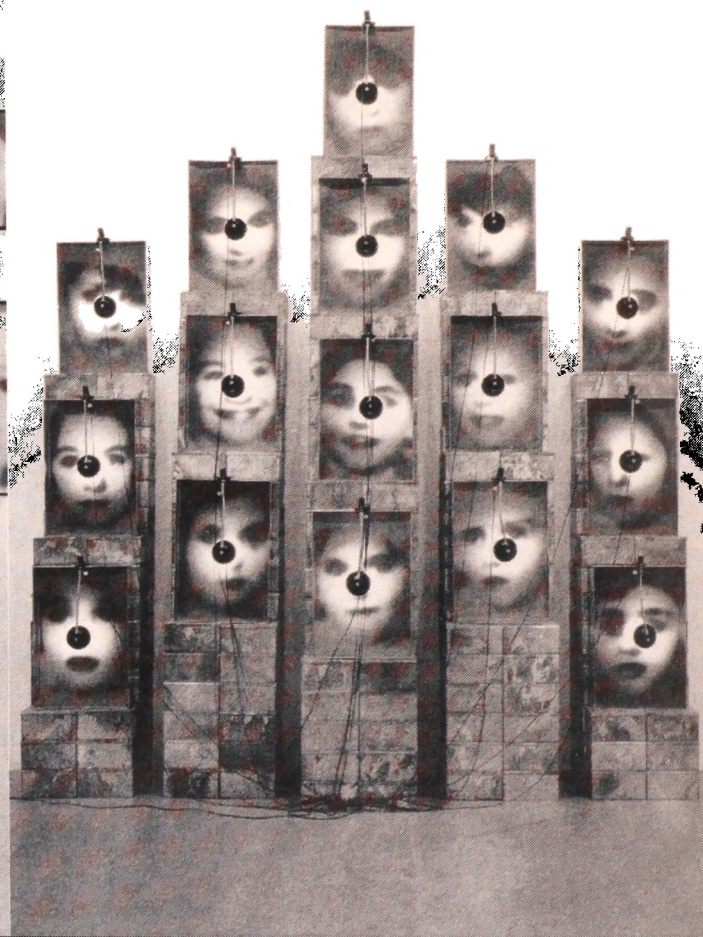
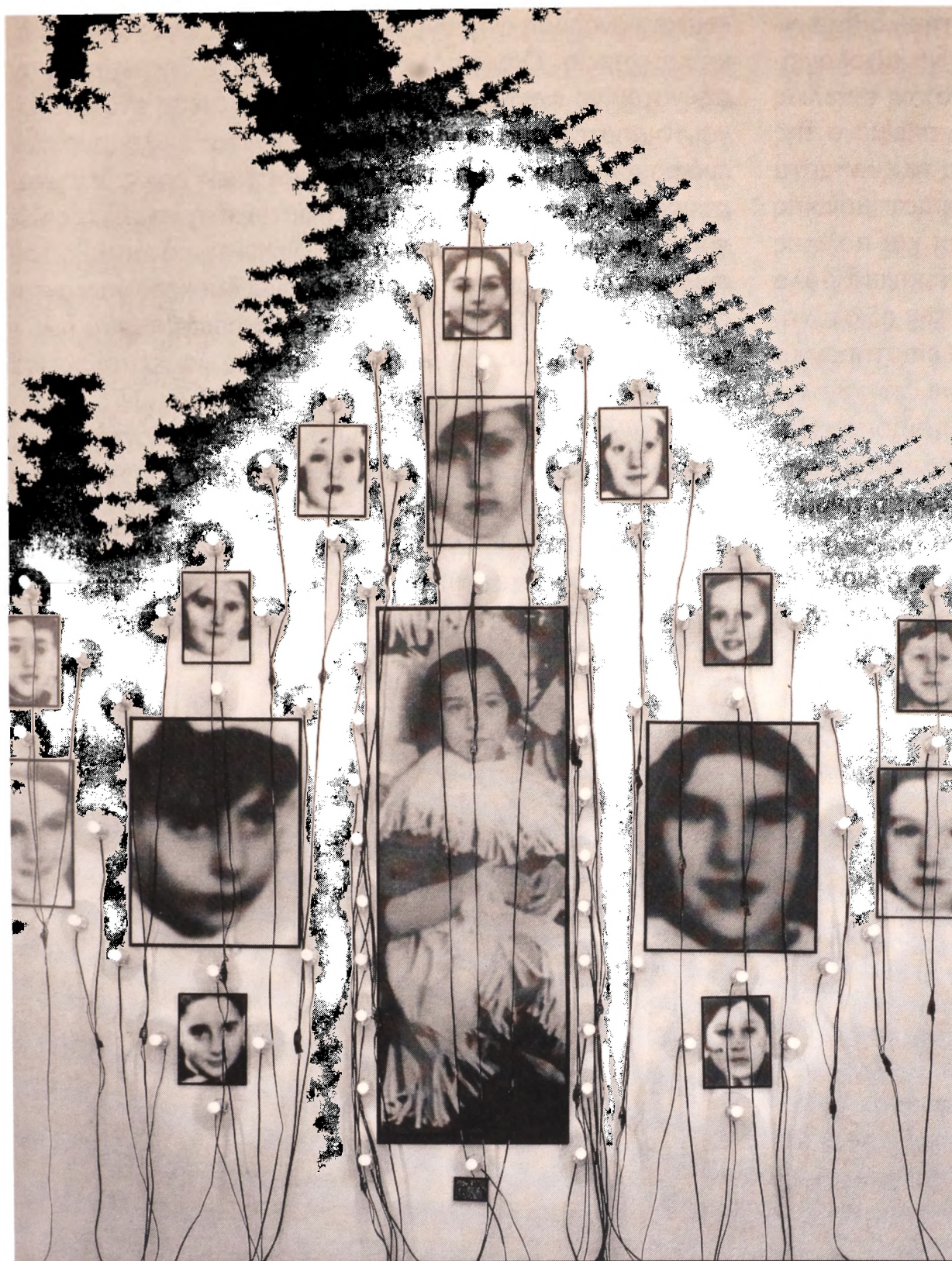
Ο ανερχόμενος ρόλος της βιολογίας στην καθημερινότητα έχει σαν αποτέλεσμα πολλές φορές να αξιολογείται η επιστημονική μας δουλειά με κριτήρια όχι εντελώς επιστημονικά. Η βιολογία είναι γνωστικό αντικείμενο της μόδας, και ως εκ τούτου οι πληροφορίες για τα ευρήματά της συχνά περνούν από χέρια αμφιβόλου επιστημονικής αξίας. Πιστεύω όμως ότι σαν διανοούμενοι και πολίτες έχουμε καθήκον να υιοθετήσουμε έναν ηγεμονικό ρόλο ώστε από τη μια πλευρά να εξασφαλίσουμε την αξιολόγηση της επιστημονικής εργασίας με αυστηρά επιστημονικά κριτήρια, και από την άλλη να διασφαλίσουμε ότι η βιολογική γνώση δεν στρεβλώνεται και δεν χρησιμοποιείται σαν εργαλείο από αυτούς που κατέχουν εξουσία και χρειάζονται ένα λογικοφανές πρόσχημα για διάφορα ανομήματα.

Ως ακροτελεύτια επισήμανση θέλω να πω ότι η βιολογία βρίσκεται σήμερα σε μια πράγματι χρυσή εποχή. Από τους προσωκρατικούς φτάσαμε στη μοριακή βιολογία που σε τε-

λευταία ανάλυση ανήγαγε τα βιολογικά φαινόμενα σε φυσική και χημεία. Όπως μόλις πριν από λίγες δεκαετίες ήταν αδύνατον να φανταστούμε ότι η μορφογένεση στα ζώα είναι το αποτέλεσμα συγκεκριμένων γονιδιακών λειτουργιών ενός σχετικά μικρού ρεπερτορίου γονιδίων, όπως δεν μπορούσαμε να φανταστούμε ότι η αναπτυξιακή λογική της μύγας είναι όμοια με τη λογική που διέπει την ανάπτυξη του ανθρώπινου εμβρύου, έτσι σήμερα είναι δύσκολο να φανταστούμε ότι η ανθρώπινη σκέψη, η συμπεριφορά, «το πνεύμα» με άλλα λόγια, θα μπορέσει ποτέ να υπόκειται και σε βιολογικούς προσδιορισμούς.

Οι γνώμες πάνω στο θέμα αυτό βέβαια διχάζονται, όμως ίσως αξίζει να θυμηθούμε πως από τη σκοπιά του Αριστοτέλη η βιολογία και η ψυχολογία δεν ήταν χωριστές επιστήμες. Πρέπει να ομολογήσω ότι δεν θα εκπλαγώ εάν η βιολογία του αύριο και όχι του μεθαύριο δώσει ορισμένα σημαντικά κλειδιά ερμηνείας φαινομένων που βρίσκονται κοντά σε ό,τι αποκαλούμε «πνεύμα».





CHRISTIAN BOLTANSKI

Αριστ. Σταθμός τραίνου,
Δεξιά. Οστεοφυλάκιο



BORIS MIKHAILOV

*Χωρίς τίτλο,
από τη σειρά Salt Lake,
Ουκρανία, 1986*

[τόπος παραθερισμού ή
στρατόπεδο συγκέντρωσης;]