

Προέλευση της ζωής, εξέλιξη και γονιδίωμα

Η σύγχρονη εξελικτική θεωρία έχει συνδέσει άρρηκτα τη μελέτη των ποικίλων χαρακτηριστικών των οργανισμών που αφορούν τη δομή και τη λειτουργία τους με τη διαλεύκανση των φυσικών διαδικασιών μέσω των οποίων οι ίδιοι οι οργανισμοί μεταβάλλονται, νέες λειτουργίες εγκαθίστανται και νέα είδη εμφανίζονται. Δίνοντας το λόγο σε έναν ποιητή, τον Octavio Paz, διαβάζουμε¹: «... η θεωρία της εξέλιξης μου φαίνεται εξαιρετικά γόνιμη: χάρη σ' αυτήν μπορούμε να φτάσουμε, χωρίς να προδώσουμε τον ορθολογισμό του σύμπαντος, σ' αυτό το περίεργο Είναι, σ' αυτό το περίεργο στοιχείο που εμφανίστηκε στην ιστορία του σύμπαντος, το ανθρώπινο πνεύμα». Ο Theodosius Dobzhansky, ένας από τους θεμελιωτές της εξελικτικής βιολογίας, αντίστοιχα λέει: «Τίποτα δεν έχει νόημα στη βιολογία εάν δεν το δούμε υπό το φως της εξέλιξης». Παρόλο που οι οργανισμοί διαθέτουν χαρακτηριστικά και ιδιότητες που αυτομάτως μας προκαλούν την εντύπωση ότι έχουν σχεδιαστεί για την εκπλήρωση ενός συγκεκριμένου «σκοπού», σήμερα γνωρίζουμε ότι αυτή η σκοπιμότητα είναι μόνο φαινομενική. Γι' αυτόν το λόγο, αντί του παραδοσιακού όρου *τελεολογία* υιοθετείται πλέον ο όρος *τελεονομία* για να περιγραφεί η ιδιότητα των βιολογικών συστημάτων να συγκροτούνται, να οργανώνονται και να επιτελούν σύνθετες λειτουργίες, όχι επειδή έχουν αποτελέσει προϊόν σχεδιασμού, αλλά ως συνέπεια της δράσης μιας *φυσικής επιλογής* των βέλτιστων από αναρίθμητες μικρές τυχαίες κληρονομήσιμες τροποποιήσεις προγονικών οργανισμών.

Οι σελίδες της *Οντοπίας* έχουν ήδη φιλοξενήσει δύο άρθρα² του γράφοντος (το 2000 και το 2002, αναφερόμενα στο εξής ως I και II αντίστοιχα) που αναφέρονται σε σχετική με το παρόν θεματολογία. Θα επιχειρήσουμε κατ' αρχάς να συνοψίσουμε ορισμένα από τα κυριότερα σημεία τους και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε επιγραμματικά ορισμένες έννοιες και διαδικασίες που αφορούν βασικά χαρακτηριστικά των οργανισμών στο «μοριακό» επίπεδο. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για την κατανόηση όσων έπονται, από τους αναγνώστες εκείνους που δεν είναι εξοικειωμένοι με τη θεματολογία των βιολογικών επιστημών. Μετά από μία συνοπτική παρουσίαση των θεωριών και κάποιων πειραματικών δεδομένων γύρω από την προέλευση της ζωής, θα αναφερθούμε εκτενέστερα στην εμφάνιση ολόενα και πιο πολύπλοκων μορφών ζωής κατά τα πρώιμα στάδια της εξέλιξης. Θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στον σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισε στη διαμόρφωση των οργανισμών η

Ο Γιάννης Αλμυράντης είναι χημικός, διδάκτωρ θεωρητικής βιολογίας, ερευνητής στο Ινστιτούτο Βιολογίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

διαπλοκή μεταξύ λειτουργικών χαρακτηριστικών (φαινοτύπου) και της γενετικής τους κληρονομιάς (γονοτύπου). Τέλος, θα αναφερθούμε στην αναγωγική σκέψη που καθόρισε τη «μοριακή επανάσταση» στη βιολογία παίρνοντας τη μορφή του «μοριακού ντετερμινισμού», και στους περιορισμούς που αυτή η προσέγγιση επιβάλλει στην κατανόηση των έμβιων όντων. Τέλος θα σκιαγραφήσουμε τη δυνατότητα περιγραφής των οργανισμών ως διαλεκτικής ενότητας μεταξύ γονοτύπου, φαινοτύπου και περιβάλλοντος, πράγμα στο οποίο κατατείνει η «συστημική» θεώρηση των οργανισμών που πρόσφατα άρχισε και διαγράφεται, καθώς από τη μοριακή βιολογία περνάμε στην εποχή της «λειτουργικής γονιδιωματικής» και της «πρωτεομικής». Η πρώτη αφορά την αλληλεπίδραση του συνόλου των γονιδίων και η δεύτερη του συνόλου των πρωτεϊνών κατά τη συγκρότηση των οργανισμών.

Στο άρθρο I περιγράφονται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του γονιδιώματος των οργανισμών (βλ. και πιο κάτω) που καθιστούν πρόσφορη τη μεταφορά του χαρακτηρισμού του ως «γενετικού κειμένου».

Το άρθρο II πραγματεύεται το κατά πόσον η ανάδυση της ζωής πρέπει να αποδίδεται σε ένα τυχαίο συμβάν ή αν μπορεί να θεωρηθεί αποτέλεσμα της βαθμιαίας συγκρότησης των πρωτο-οργανισμών μέσω μιας εξελικτικής διαδικασίας. Αυτή θα συνίστατο σε συσσώρευση βαθμίδων αυτοοργάνωσης φυσικοχημικών σχηματισμών προϊούσας πολυπλοκότητας, εφόσον τα αναπτυσσόμενα χαρακτηριστικά οδηγούσαν σε καλύτερη αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών αντιξοοτήτων, όπως συμβαίνει και κατά τη βιολογική εξέλιξη. Αυτή η θεώρηση έγινε δυνατή με την ανάπτυξη της «θερμοδυναμικής μακριά από την ισορροπία» και της «θεωρίας των πολύπλοκων συστημάτων», δηλαδή συστημάτων που χαρακτηρίζονται από μηχανισμούς ανάδρασης και από «μη γραμμική» δυναμική (βλ. π.χ. Nicolis και Prigogine 1989).

Το γονιδίωμα περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της γενετικής κληρονομιάς ενός οργανισμού και συγκροτείται από μακρομόρια DNA, τα οποία συνοδεύονται από ένα σημαντικό αριθμό πρωτεϊνών, συνιστούν τα χρωματοσώματα. Κάθε μόριο DNA είναι μία μακρότατη διαδοχή από τα 4 νουκλεοτίδια (μικρά μόρια συμβολιζόμενα ως A, G, C, και T). Η αλληλουχία των νουκλεοτιδίων μπορεί να θεωρηθεί ως ψηφιακή εγγραφή, δηλαδή κείμενο γραμμένο στο τετραγράμματο αυτό αλφάβητο. Να θυμίσουμε ότι τμήματα των χρωματοσωμάτων «μεταγράφονται» επιλεκτικά, σε διάφορες φάσεις της ζωής του κυττάρου, σε σχετικά βραχύβια μακρομοριακά αντίγραφα, γραμμένα πάλι σε τετραγράμματα νουκλεοτιδική γραφή, αυτή τη φορά στο συγγενές του DNA μόριο RNA (μήνυμα RNA). Αυτό με τη σειρά του υπαγορεύει την κατασκευή από ειδικά υποκυτταρικά οργανίδια (τα ριβοσώματα) των δομικών και λειτουργικών (δηλαδή βιολογικών καταλυτών-ενζύμων) μακρομορίων που είναι οι πρωτεΐνες. Αυτές είναι μακρές αλληλουχίες που περιλαμβάνουν είκοσι διαφορετικά μικρά μόρια, τα «αμινοξέα». Στη βιολογικά ενεργή τους μορφή οι πρωτεϊνικές αλυσίδες είναι αναδιπλωμένες με σύνθετο τρόπο που εξασφαλίζει τη χημική τους δράση και εξειδίκευση. Η «μετάφραση» του «γονιδίου», δηλαδή του μέρους του DNA (σε μορφή μηνύματος RNA) που αντιστοιχεί στη σύνθεση μίας πρωτεΐνης, από τετραγράμματα (A, G, C, T) σε εικοσαγράμματα (αμινοξέα) γραφή γίνεται βάσει του «γενετικού κώδικα». Έτσι ονομάζεται ο πίνακας που μας λέει ποιο αμινοξύ από τα είκοσι «κωδικοποιείται» από καθεμία από τις 64 δυνατές τριάδες νουκλεοτιδίων. Ο γενετικός κώδικας θεωρείται «εκφυλισμένος» ή πλεοναστικός γιατί κάθε αμινοξύ μπορεί να κωδικοποιείται από περισσότερες από μία τριά-

δες νουκλεοτιδίων. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι πρωτεΐνες συνδέονται με την «νύλοποίηση» του οργανισμού, δηλαδή το μεταβολισμό, ενώ τα DNA και RNA (νουκλεϊκά οξέα) είναι φορείς της απαραίτητης πληροφορίας καθώς εγγράφουν το γενετικό (κληρονομικό) μήνυμα που καθιστά τους απογόνους παρόμοιους των προγονικών οργανισμών. Ο διπλασιασμός του DNA κάθε κυττάρου, που προηγείται της κυτταρικής διαίρεσης, αποτελεί το απαραίτητο «μοριακό αντίστοιχο» της αναπαραγωγής των οργανισμών. Τοίτο γίνεται δυνατό λόγω της δίκλωνης δομής του DNA, όπου κατά την αντιγραφή του οι δύο κλώνοι αποχωρίζονται και έκαστος χρησιμοποιείται ως εκμαγείο για τη σύνθεση του συμπληρωματικού του. Έτσι οι εγγραφές στο επίπεδο του DNA μπορεί να θεωρηθούν ως τα σημαίνοντα (λέξεις - φράσεις) των οποίων τα σημαινόμενα είναι οι πρωτεΐνες-ένζυμα και τελικά οι αντίστοιχες λειτουργίες. Στο άρθρο I παρουσιάστηκε ένας αριθμός «γλωσσολογικών» ιδιοτήτων του γονιδιωματικού κειμένου οι οποίες εμφανίζονται και στις ανθρώπινες γλώσσες, όπως: (1) η πολικότητα (σπάνη των παλίνδρομων στις γλώσσες και στο DNA), (2) η πλεοναστικότητα (δυνατότητα ανάγνωσης ελλειπών γραπτών κειμένων και αντίστοιχα «εκφυλισμός» του γενετικού κώδικα), (3) η αμφισημία (φράσεις που είναι δυνατόν να κατανοούνται με διαφορετικούς τρόπους, αλλά και γονίδια που παράγουν διαφορετικές πρωτεΐνες βάσει των «συμφραζομένων») κ.ά.

Την πειραματική απόδειξη από τον Παστέρ της αδυναμίας «αυτόματης γένεσης», δηλαδή εμφάνισης ζωής στο εργαστήριο από άβιες πρώτες ύλες, την ακολούθησε ένα μακρό διάστημα κατά το οποίο καμία προσπάθεια για την επιστημονική διερεύνηση της προέλευσης της ζωής δεν φαινόταν δυνατή. Εντούτοις, από τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, σημαντικοί επιστήμονες πρότειναν διάφορες καινούριες ιδέες, όπως τον ενδεχόμενο ρόλο του HCN (Pflügger), τη θεωρία της πανσπερμίας του Arrhenius (που απλώς μεταθέτει το πρόβλημα, αφού υποθέτει μεταφορά των πρώτων μονοκυττάρων οργανισμών από άλλους πλανήτες), την υπόθεση του Troland για δημιουργία ενός πρωταρχικού ενζύμου από ένα τυχαίο γεγονός στον αρχικό ωκεανό κ.ά. (για σχετική βιβλιογραφία βλ. Miller κ.ά. 1997). Ίσως η πιο ενδιαφέρουσα πρόταση αυτής της περιόδου ήταν αυτή του Muller (1926), για τον τυχαίο σχηματισμό του πρώτου γονιδίου, το οποίο θεωρήθηκε προικισμένο με τις ιδιότητες της αυτοκατάλυσης, ετεροκατάλυσης και μεταλλαξιμότητας. Να υπενθυμίσουμε στον αναγνώστη ότι εκείνη την εποχή ως γονίδιο νοείτο ο φορέας της αναγκαίας πληροφορίας για ένα κληρονομούμενο χαρακτηριστικό, ενώ η χημική του ταυτότητα ήταν άγνωστη (εικάζονταν πάντως ότι πρόκειται για πρωτεΐνες). Αυτές οι απόψεις δεν κίνησαν το γενικότερο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, ενδεχομένως επειδή δεν προσέφεραν μία ολική θεωρία για την προέλευση της ζωής, και κυρίως γιατί έλειπαν οι προτάσεις για πειραματική δοκιμή των υποθέσεων. Η ανταπόκριση υπήρξε εντελώς διαφορετική μετά τη δημοσίευση της αγγλικής μετάφρασης του βιβλίου του Oparin³ *The Origin of Life* (1938), δύο χρόνια μετά την εμφάνισή του στα ρωσικά και δεκατέσσερα χρόνια μετά την εμφάνιση ενός αρχικού συνοπτικού πονήματος από τον συγγραφέα πάνω στο ίδιο θέμα.

Οι καθοριστικές ιδέες της θεωρίας που εισηγείται ο συγγραφέας της Προέλευσης της Ζωής είναι οι εξής:

1. Η ιδέα της πρωταρχικότητας των αναερόβιων ζυμώσεων και των ετερότροφων συστημάτων (πρωτο-οργανισμών που κατανάλωναν άβια υλικά).

2. Η υπόθεση μίας αρχικής αναγωγικής ατμόσφαιρας (CH_4 , NH_3) αναγκαίας για την προβιοτική σύνθεση οργανικών ενώσεων. Ο Οπάριν έλαβε υπόψη του, διατυπώνοντας αυτή την υπόθεση, τα πρόσφατα τότε ευρήματα για τη σύνθεση των πλανητικών ατμοσφαιρών, καθώς και την επισήμανση του Vernadsky για την ενδεχόμενη απουσία O_2 στην αρχική ατμόσφαιρα εφόσον τούτο προέρχεται από τη δράση φωτοσυνθετικών οργανισμών. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι αποτελεί αδικία για τον Οπάριν η συγγή αναφορά στη θεωρία του ως «θεωρία Oparin-Haldane». Η αρχική δημοσίευση του Οπάριν προηγείται κατά πέντε χρόνια της αντίστοιχης του Χαλντέην, στην οποία άλλωστε η προτεινόμενη σύνθεση της αρχικής ατμόσφαιρας (CO_2 , NH_3) δεν θα ήταν αποτελεσματική για την απαιτούμενη προβιοτική σύνθεση οργανικών ενώσεων (βλ. Miller κ.ά. 1997). Ο ίδιος ο Χαλντέην αναγνώρισε το '63 την προτεραιότητα του Οπάριν στη διατύπωση της θεωρίας για την προέλευση της ζωής (Fox 1965).
3. Η υπόθεση της μεταγενέστερης μετάβασης μέρους των οργανισμών από τον ετερότροφο στον αυτότροφο χαρακτήρα.
4. Η υπόθεση για το ρόλο κατά την προβιοτική εξέλιξη των συσσωματωμάτων (coacervates) δηλαδή σωματιδίων πλούσιων σε μεγαλομόρια, που δημιουργούνται σε εργαστηριακές συνθήκες μέσα σε αραιά γαλακτώματα. Η μελέτη τους απετέλεσε και τη βασική πειραματική συνεισφορά του, κυρίως θεωρητικού, Οπάριν. Αυτός έδειξε πλήθος ιδιοτήτων του σχηματισμού των συσσωματωμάτων, την αύξησή τους μέσω αντιδράσεων «τύπου» μεταβολισμού, τη διαίρεσή τους σε θυγατρικά μετά από αύξηση και ότι η επιβίωσή τους γίνεται μακρότερη όταν στεγάζουν αντιδράσεις πολυμερισμού. Έδειξε, επίσης, ότι τα συσσωματώματα σχηματίζουν αυτόματα, υπό ορισμένες συνθήκες, μεμβράνες που τα διαχωρίζουν από το περιβάλλον διάλυμα. Τα συσσωματώματα μελετήθηκαν και από τον S.W. Fox. Τα σωματίδια αυτά συγκεντρώνουν πολλές πιθανότητες να είναι παρόμοια με αυτά που αποτέλεσαν τα πρωτοκύτταρα, προδρόμους των τωρινών κυττάρων.
5. Ο συστηματικός τρόπος που αυτές οι ιδέες διατυπώθηκαν σχετικά χωρίς κενά και με τη δυνατότητα πολλές πλευρές της θεωρίας να μπορούν να ελεγχθούν πειραματικά.

Ο H.C. Urey (1952) έπαιξε σημαντικό ρόλο στο να προσέξει η επιστημονική κοινότητα τη θεωρία του Οπάριν. Τα περίφημα πειράματα του Miller (1953) περιλάμβαναν την παραγωγή από μείγματα αερίων που μιμούνταν τη σύνθεση της πρωταρχικής ατμόσφαιρας παρουσία ηλεκτρικών σπινθήρων, ποικιλίας οργανικών ενώσεων μεταξύ των οποίων και αμινοξέων. Αργότερα παράχθηκαν και τα συστατικά των νουκλεϊκών οξέων από απλά μόρια σε συνθήκες της προβιοτικής γης (Ορό 1960, Ferris κ.ά. 1968, βλ. για αναλυτικότερη παρουσίαση Dickerson 1978). Εντούτοις, ιδιαίτερες δυσκολίες συναντώνται όταν επιδιώκεται η σύνθεση από αυτά τα συστατικά νουκλεϊκών οξέων αβιοτικά, δηλαδή απουσία ειδικών ενζύμων (πρωτεϊνών). Τούτο ειννοεί την υπόθεση που συζητάμε πιο κάτω (βλέπε και II) για ενδεχόμενη σύνθεση αυτών των μακρομορίων μετά την εμφάνιση των πρωτεϊνών.

Τα μόρια που συντίθενται από αντιδράσεις όλων των παραπάνω τύπων παράγονται με μορφή «ρακεμικών μειγμάτων», δηλαδή σχηματίζονται σε ίσους αριθμούς μόρια που έχουν μεταξύ τους την αμοιβαία γεωμετρική σχέση που έχουν τα δύο μας χέρια (δηλαδή το ένα να αποτελεί εικόνα σε καθρέφτη του άλλου) και ονομάζονται «οπτικά ισομερή». Οι σημερινοί οργανισμοί ως γνωστόν περιλαμβάνουν αποκλειστικά τη μία από τις δύο αυτές εκδοχές κά-

θε βιομορίου. Μάλιστα, τα ίδια τα ένζυμα συντίθενται στη μια μορφή αποκλειστικά και είναι απόλυτα «στερεοειδικά», δηλαδή με τη σειρά τους, ως βιολογικοί καταλύτες συνθέτουν προϊόντα που είναι καθαρά οπτικά ισομερή. Η μόνη δυνατότητα από ρακεμικά μείγματα να οδηγήθηκαν τα έμβια όντα στη σημερινή σύστασή τους παρέχεται από τη λειτουργία στα προ- και πρωτο-βιοτικά συστήματα πολύπλοκων δικτύων αναδραστικών αλληλεπιδράσεων οι οποίες αποδεικνύεται ότι, όταν ξεπεράσουν ένα κατώφλι πολυπλοκότητας, οδηγούν αυτόματα στην παραγωγή αποκλειστικά του ενός οπτικού ισομερούς (βλ., π.χ. Decker 1974). Η επιλογή του επικρατούντος ισομερούς μπορεί να έγινε τυχαία, οπότε, θεωρητικά, θα περιμέναμε ότι, σε έναν άλλο πλανήτη, η ανάδυση της ζωής μπορεί να έχει οδηγήσει σε οργανισμούς που η σύστασή τους περιλαμβάνει, αντίθετα από εμάς, δεξιόστροφα αμινοξέα και αριστερόστροφα σάκχαρα. Κατά μια άλλη εκδοχή (Kondepudi και Nelson 1985), η επιλογή έγινε βάσει μίας ελάχιστης ενεργειακής ασυμμετρίας που είναι πανταχού παρούσα (σε όλο το γνωστό σύμπαν), άρα σε ενδεχόμενες επαναλήψεις του γήινου προβιοτικού συστήματος θα οδηγούσε αναγκαστικά στην ίδια επιλογή ασυμμετρίας. Είτε τυχαία είτε συστηματική, μία τέτοια απόλυτη ασύμμετρη σύνθεση μπορεί να έχει παραχθεί μόνο μέσω ισχυρών συνεργηστικών φαινομένων, δηλαδή αναδράσεων που σε χημικά συστήματα υλοποιούνται ως διασυνδεδεμένες αυτοκαταλυτικές αντιδράσεις. Αυτό το εύρημα σε συνδυασμό με σειρά αντίστοιχων συλλογισμών σε σχέση με άλλες ιδιότητες των οργανισμών (π.χ. την οικουμενικότητα και τη συγκεκριμένη δομή του, εν χρήση από όλα τα έμβια όντα, γενετικού κώδικα) και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της ανάπτυξης της μελέτης των χωστικών και των αυτοοργανούμενων συστημάτων (βλ., για μια εισαγωγή, Nicolis και Prigogine 1989), ισχυροποιεί ως το πιθανότερο το σενάριο που θεωρεί τη ζωή ως απόρροια μάλλον μιας προβιοτικής εξελικτικής διαδικασίας παρά ενός μεμονωμένου συμβάντος⁴.

Στους σημερινούς οργανισμούς, ο θεμελιωδέστερος κύκλος ανάδρασης είναι αυτός που συμβολικά περιγράφεται ως «DNA → RNA → πρωτεΐνες», και ο οποίος «κλείνει» μέσω της ρύθμισης των διαδικασιών βιοσύνθεσης και επιλεκτικής «ανάγνωσης» των DNA και RNA από εξειδικευμένα πρωτεϊνικά μόρια. Το εξελικτικό ερώτημα που ανακύπτει είναι ποια από τις δύο αυτές κατηγορίες βιολογικών μακρομορίων: νουκλεϊκά οξέα (DNA, RNA) ή πρωτεΐνες, «ήρθε πρώτο».

Η θεωρία του Οπάριν απέδιδε πρωταρχικότητα στο μεταβολισμό, εφόσον την εποχή της διατύπωσής της ήταν άγνωστος ο ρόλος των νουκλεϊκών οξέων. Ο Eigen (βλ. Eigen & Schuster 1979), αργότερα, επεξεργάστηκε την υπόθεση της πρωταρχικότητας των αναδιπλασιαζόμενων μορίων, συγγενών του σημερινού RNA, το οποίο σε αντίθεση με το DNA έχει κοινές με τις πρωτεΐνες ιδιότητες κατάλυσης χημικών αντιδράσεων (χαρακτηριστικό ενζύμων, το οποίο δίνει σε συγκεκριμένα μόρια RNA το χαρακτηρισμό *ribozymes*, βλ. π.χ. Alberts κ.ά. 1994, σ. 8). Η θεωρία αυτή που αποδίδει πρωταρχικότητα στα «γίμνα γονίδια» θυμίζει την παλαιότερη ιδέα του Muller που αναφέραμε. Όπως έχουμε περιγράψει λεπτομερώς αλλού (βλ. II) σήμερα έχουν προταθεί απόψεις που θεωρούν πιθανότερη μια «διπλή προέλευση της ζωής»⁵ (βλ. επίσης Kaufmann 1996), όπου κυστιδία, που περιέλλειαν πρωτεϊνικού τύπου μόρια, αποτελούσαν πρωτο-οργανισμούς καθαρά μεταβολικού τύπου. Τα μόρια αυτά συγκροτούσαν δίκτυα αμοιβαία καταλυόμενων αντιδράσεων. Όταν το κυστιδίο γινόταν αρκετά μεγάλο, διαιρούνταν με τυχαίο τρόπο «κληροδοτώντας» στα θυγατρικά

την ταυτότητά του χωρίς να μεσολαβούν «μοριακοί αντιγραφείς». Κάποια κυστίδια απέκτησαν ως «παράσιτα» πληθυσμούς μορίων τύπου RNA, το οποίο είναι γνωστό ότι μπορεί να σταθεροποιηθεί και να αναπαραχθεί μόνο παρουσία κατάλληλων πρωτεϊνών (ίσως τέτοιες να ήταν, κατά τύχη, κάποιες από τις πολυπληθείς πρωτεΐνες των κυστιδίων). Το RNA έγινε κάποια στιγμή στον εξελικτικό χρόνο «χρήσιμο» στους φορείς του μετατρέποντας τον απλό παρασιτισμό σε αμοιβαία επωφελή συμβίωση. Τούτο όμως δεν σημαίνει ότι η χρησιμότητά του εξαρχής περιλάμβανε την εγγραφή των πρωτεϊνικών μορίων σε μορφή νουκλεϊκών οξέων βάσει ενός κώδικα τριπλετών, όπως σήμερα.

Η ερευνητική ομάδα του Poole και συνεργατών (1998) έχουν επεξεργαστεί ένα αρκετά αναλυτικό μοντέλο για την προέλευση των σημερινών κυττάρων από έναν πρωτο-βιοτικό «κόσμο RNA». Αυτό δεν είναι ασύμβατο με την πιο πάνω άποψη της αρχικής εμφάνισης του RNA σε ένα περιβάλλον «καθαρά μεταβολικής» πρωτεϊνικής «ζωής». Κατά τους Poole κ.ά., το λειτουργικό-καταλυτικό RNA μπορεί να δημιουργήσει μοριακά συμπλέγματα με πρωτεΐνες που ήταν αποτελεσματικότερα εργαλεία. Αργότερα στον εξελικτικό χρόνο άρχισαν να παρασκευάζονται από τέτοια «ριβο-πρωτεϊνικά συμπλέγματα» οι πρώτες πρωτεΐνες που η σύνθεσή τους υπαγορευόταν (βάσει ενός πρωτόγονου «γενετικού κώδικα») από αλληλουχία RNA που αρχικά ήταν επέκταση του ίδιου του RNA μορίου που ήταν καταλυτικά ενεργό. Να σημειωθεί ότι τα σημερινά ριβοσώματα είναι συνδυασμοί πρωτεϊνών και RNA, αποτελώντας έτσι «μοριακά απολιθώματα» του «κόσμου RNA». Σε άμεση γειτονία (μέσα σε «ιντρόνια», βλ. παρακάτω) με αλληλουχίες DNA που κωδικοποιούν ορισμένες εξελικτικά «αρχαίες» πρωτεΐνες, πρόσφατα έχουν βρεθεί περιοχές που κωδικοποιούν καταλυτικώς ενεργά (ακόμη και σήμερα) «μικρά RNAs». Τούτο μπορεί να σημαίνει ότι οι αρχέγονοι οργανισμοί είχαν (όπως οι σημερινοί ευκαρυώτες) τις περιοχές γονιδιώματος που κωδικοποιούσαν για πρωτεΐνες διασκορπισμένες κατά τμήματα ανάμεσα σε «μη κωδικοποιούσες» περιοχές.

Η αποκρυστάλλωση των χαρακτηριστικών των πρώτων μονοκύτταρων οργανισμών συνέβη πριν περίπου $1,8 \times 10^9$ έτη (βλ. Alberts κ.ά. 1994, σ. 16 κ.ε.). Ορισμένοι από αυτούς είχαν (i) τη δυνατότητα να φωτοσυνθέτουν, δηλαδή να χρησιμοποιούν την ενέργεια του ηλιακού φωτός για να οικοδομούν τα απαραίτητα για τη ζωή τους βιομόρια και (ii) τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν το οξυγόνο (που πλέον κυριαρχούσε στην ατμόσφαιρα ως παραπροϊόν της φωτοσύνθεσης) για τη βιολογική «καύση» οργανικών μορίων και την παραγωγή ενέργειας. Τα μόνα σχετικά σίγουρα χαρακτηριστικά αυτών των μακρινών προγόνων είναι αυτά που διαπιστώνονται σήμερα να είναι κοινά σε όλους τους οργανισμούς: τα κοινά δομικά χαρακτηριστικά (μεμβράνη, κυτταρόπλασμα κ.ά.), η ύπαρξη της σχέσης γονιδιώματος-πρωτεϊνών, τα βασικά δίκτυα βιοχημικών αντιδράσεων και πολλά άλλα ακόμα. Όμως η ακριβής εικόνα τους θα μας διαφεύγει ίσως για πάντα.

Το θεμελιωδέστερο επόμενο βήμα στην εξέλιξη υπήρξε η διαμόρφωση των δύο μεγάλων κλάδων σημερινών οργανισμών, των *προκαρυωτικών* και των *ευκαρυωτικών* κυττάρων, που ως σημαντικότερη διαφορά τους (μορφολογικά) θεωρείται ο εγκλεισμός ή μη (ευ- και προ- αντίστοιχα) του γονιδιώματος σε ένα ξεχωριστό κυτταρικό διαμέρισμα, τον πυρήνα. Εδώ ερχόμαστε ξανά στη βασική διχοτομία που χαρακτηρίζει τους οργανισμούς, μεταξύ λειτουργίας και ψηφιακής καταγραφής, πρωτεϊνών και νουκλεϊκών οξέων, *σημαινομένου*

και *σημαίνοντας*. Η διχοτομία αυτή δεν είναι απόλυτη: Το RNA έχει ορισμένες καταλυτικές ιδιότητες, ενώ πληροφορία μεταφέρεται στους απογόνους και με άλλους τρόπους, π.χ. μέσω πρωτεϊνών του μητρικού οργανισμού, μέσω χαρακτηριστικών του «κυτταροσκελετού» (βλ. π.χ. Alberts κ.ά. 1994, σ. 820, 1082). Πάντως η πορεία προς το ευκαρυωτικό κύτταρο (τον τύπο κυττάρων που συνιστούν αποκλειστικά τους πολυκύτταρους οργανισμούς) βαίνει παράλληλα με την αυξανόμενη χειραφέτηση του μηχανισμού της μεταφοράς γενετικής πληροφορίας από τον υποόλιγο κυτταρικό μηχανισμό. Η ακρίβεια κατά το διπλασιασμό του DNA αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 1000 καθώς τα ευκαρυωτικά κύτταρα έχουν αναπτύξει έναν σύνθετο μοριακό μηχανισμό ελέγχου της αντιγραφής (proof reading). Στα προκαρυωτικά (μικροβιακά) κύτταρα το γονιδίωμα σχεδόν σε όλο του το μήκος κωδικοποιεί για πρωτεΐνες, ενώ μεταξύ των γονιδίων παρεμβάλλεται ελάχιστο «μη κωδικοποιούν» DNA. Το γονιδίωμα των ευκαρυωτών, αντίθετα, μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό κωδικοποιεί για αλληλουχίες πρωτεϊνών βάσει του γενετικού κώδικα. Το 90-97% του συνολικού μήκους των χρωματοσωμάτων αποτελείται από μη κωδικοποιούσες αλληλουχίες, που παρεμβάλλονται μεταξύ γονιδίων, αλλά και που διακόπτουν την κωδικοποιούσα αλληλουχία ενός γονιδίου και ονομάζονται «ιντρόνια». Η τελική αδιάσπαστη κωδικοποιούσα αλληλουχία πραγματοποιείται μόνο στο επίπεδο του (αντιγράφου) μηνύματος RNA αφού κατάλληλα ένζυμα κόβουν τα παρεμβλλόμενα τμήματα και επανασυνθέτουν τα κωδικοποιούντα. Ο διαχωρισμός των περιοχών που λαμβάνει χώρα η μεταγραφή (DNA → RNA, στον πυρήνα) και η μετάφραση (RNA → πρωτεΐνες, στο κυτταρόπλασμα) ήταν απαραίτητος για να αναπτυχθούν πολλοί από τους μηχανισμούς ελέγχου έκφρασης γονιδίων μέσω ποικίλων τροποποιήσεων που επισυμβαίνουν στο αρχικό μήνυμα RNA. Αυτοί οι μηχανισμοί είναι απολύτως απαραίτητοι, όπως αναφέρουμε και πιο κάτω, για την παραγωγή από το αρχικό γονιμοποιημένο ωάριο της ποικιλίας κυτταρικών τύπων και ιστών που χαρακτηρίζει τους πολυκύτταρους οργανισμούς.

Όπως αναφέραμε παρουσιάζοντας προηγουμένως στοιχεία της θεωρίας του Poole και των συνεργατών του για τον «κόσμο RNA», είναι πιθανόν κοινοί πρόγονοι όλων των σημερινών κυττάρων, ενώ δεν διέθεταν πυρήνα, να είχαν δομή γονιδιώματος ανάλογη των σημερινών ευκαρυωτικών, με μεγάλες μη μεταφραζόμενες περιοχές μεταξύ των γονιδίων και άλλες που διέκοπταν τα κωδικοποιούντα τμήματα. Οι αμετάφραστες περιοχές γνωρίζουμε ότι περιλαμβάνουν τμήματα που έχουν σημαντική «ρυθμιστική» δράση, καθορίζοντας το πότε και υπό ποιες προϋποθέσεις θα μεταγραφούν και θα μεταφραστούν τα κοντινά τους γονίδια.

Πολύ μεγάλες περιοχές που δεν παίζουν ευθέως σημαντικό ρυθμιστικό ρόλο φαίνεται ότι φτιάχνουν ένα φυσικοχημικό περιβάλλον απαραίτητο για τη λειτουργικότητα του γονιδιώματος. Αυτή η πολύπλοκη και μακρόβια στον εξελικτικό χρόνο δομή έχει χαρακτηριστεί προσφύτως «οικολογία του μη κωδικοποιούντος DNA» (Holmquist, 1989). Οι προαναφερθείσες ιδιομορφίες του ευκαρυωτικού γονιδιώματος, καθώς και πολλές άλλες που έχουν εντοπιστεί, είναι απαραίτητες ώστε να κάνουν δυνατό τον ευέλικτο χειρισμό του όγκου πληροφορίας που περιλαμβάνει και που είναι απαραίτητος για την εμφάνιση των πολυκύτταρων οργανισμών. Μέσω της διαφορικής έκφρασης γονιδίων και ομάδων γονιδίων γίνεται δυνατή η εμφάνιση των εκατοντάδων διαφορετικών τύπων κυττάρων σε μία πολύπλοκη και αυτορυθμιζόμενη χωροταξία του αναπτυσσόμενου εμβρύου, που οδηγεί

στα ζώα και φυτά που απαρτίζουν τη βιόσφαιρα. Εντούτοις, το σύνολο του μη κωδικοποιούντος DNA δεν φαίνεται να είναι απαραίτητο για τη λειτουργία των οργανισμών, πράγμα που αποδεικνύεται από τις μεγάλες διαφορές μεγέθους γονιδιώματος συγγενών οργανισμών, αλλά και από ακραίες περιπτώσεις, όπως το ψάρι *Fugu* (Brenner κ.ά. 1993) που διαθέτει ιδιαίτερα συμπιεσμένο γονιδίωμα, ως και 6-7 φορές μικρότερο από άλλους παρόμοιους ιχθείς. Σήμερα πιστεύεται ότι το μεγάλο ποσοστό «παρεμβαλλόμενου» DNA, αλλά και το παράδοξο της κατάτμησης των αλληλουχιών που κωδικοποιούν για τις περισσότερες πρωτεΐνες, επικράτησαν γιατί ευνοούσαν την εξέλιξη μέσω αναμείξεως του γονιδιωματικού κειμένου που οδηγεί στην ταχύτερη (στον εξελικτικό χρόνο) εμφάνιση νέων γονιδίων, την αναδιάταξη των μηχανισμών ρύθμισης της «έκφρασης» συγκεκριμένων πρωτεϊνών κ.λπ. Μία συνοπτική αλλά εξαιρετικά διαφωτιστική ανάλυση των χαρακτηριστικών και της εξέλιξης των προ- και ευ-καρυωτικών οργανισμών μπορεί να βρει ο αναγνώστης της *Οντοπίας* στο άρθρο του Κ. Σέκερη⁶ στα πλαίσια του αφιερώματος «Το φαινόμενο της ζωής» (Μάιος-Ιούνιος 2002). Επίσης βλ. Schopf (1978).

Από τη μέχρι τώρα γνώση μας των βασικών χαρακτηριστικών της ζωής, που ορισμένα από αυτά σκιαγραφήθηκαν στις προηγούμενες σελίδες, γίνεται εμφανής η συνθετικότητα του αντικείμενου της βιολογίας, όπως αυτό διαμορφώνεται σήμερα. Σε κάποιες επιπλέον πλευρές της σύγχρονης βιολογίας θα αναφερθούμε και στη συνέχεια, καθώς είναι καίριας σημασίας για την καλύτερη κατανόηση του εμβίου και της σχέσης μεταξύ γονιδιώματος και οργανισμού.

Η βιολογία μπορεί να θεωρηθεί ως η κατεξοχήν «ιστορική» μεταξύ των (θετικών) επιστημών, εφόσον τα έμβια όντα διαμορφώνονται προερχόμενα από μία σειρά προγόνων που τροποποιούν ή διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους βάσει φυσικής επιλογής. Έτσι οι σημερινοί οργανισμοί φέρουν συχνά χαρακτηριστικά που αποκαλύπτουν μέρος της μακράς αυτής προϊστορίας, όπως π.χ. η γεωλογία διατηρεί το στοιχείο της «ιστορικότητας» αφού η χωροταξία της διαδοχής των γεωλογικών σχηματισμών αποκαλύπτει το παρελθόν του γήινου φλοιού.

Ο πολλαπλασιασμός των κυττάρων και η αναπαραγωγή των οργανισμών χωρεί μέσω της αντιγραφής μίας μοριακής γενετικής ψηφιακής εγγραφής (του γονιδιώματος). Τούτο δίνει στη βιολογία τη μοναδικότητα του να είναι «ιστοριογραφική» με την έννοια της διατήρησης της βιολογικής μνήμης με τη μορφή ενός «φυσικού» κειμένου, τόσο της άμεσης (που αφορά κάθε αναπτυσσόμενο οργανισμό) όσο και της πολύ απομακρυσμένης, που η μελέτη της αποτελεί το αντικείμενο του κλάδου της «μοριακής εξέλιξης» μέσω συγκρίσεων γονιδιωμάτων διαφορετικών οργανισμών. Η σχέση σημαίνοντος-σημαινομένου που υπάρχει μεταξύ αλληλουχιών DNA και πρωτεϊνών ενισχύει δραματικά τη δυνατότητα της εξέλιξης να «δημιουργεί» νέα χαρακτηριστικά. Συχνά, από «λάθη αντιγραφής», συμβαίνει παραγωγή μέσα στο γονιδίωμα αντιγράφων ολόκληρων ομάδων γονιδίων, ή συνδυασμός γονιδιακών περιοχών μεταξύ τους, παράγοντας νέες πρωτεΐνες που αποτελούν «χίμαιρες» τμημάτων άλλων πρωτεϊνών. Αυτά και άλλα ανάλογα φαινόμενα δεν θα ήταν δυνατά εάν ανάμεσα στις γενεές των οργανισμών δεν παρεμβαλλόταν η μεταφορά της πληροφορίας, χειραφετημένης από τις συγκεκριμένες λειτουργίες και δομές που αφορά, και «ψηφιοποιημένης», με τη μορφή του «γενετικού κειμένου».

Σημαντικοί εξελικτικοί βιολόγοι σήμερα θεωρούν ότι τα συνήθη λάθη αντιγραφής (τυχαίες αντικαταστάσεις ή παραλήψεις μεμονωμένων νουκλεοτιδίων) μπορούν να οδηγήσουν μόνο σε σταδιακές αλλαγές των ήδη υπαρχόντων χαρακτηρισμών, τον τύπον που κυρίως περιγράφει ο Δαρβίνος (π.χ. την επιμήκυνση του λαιμού της καμήλοπαρδαλης, εφόσον τούτο της έδινε πλεονέκτημα στη ζωή της στη σαβάνα). Όμως, υποστηρίζουν, οι εμφανίσεις ριζικά νέων χαρακτηριστικών που κάποτε εγκαινιάζουν νέες ομάδες οργανισμών θα πρέπει να αποδίδονται σε μείζονα γεγονότα γονιδιωματικών αναδιατάξεων («μακρομεταλλάξεων»), οπότε τα νέα χαρακτηριστικά εμφανίζονται ως ασυνεχή γεγονότα στην ιστορία των ειδών. Επίσης έχει βρεθεί ότι το πυρηνικό ευκαρυωτικό γονιδίωμα έχει προέλθει από συνένωση των γονιδιωμάτων δυο προγονικών προκαρυωτών (για τη φύση τους δεν υπάρχει ομοφωνία, βλ. Σέκερης⁶, Vellai και Vida 1999), ενώ περιλαμβάνει επίσης σημαντικό αριθμό επαναλήψεων ολόκληρων γονιδιωματικών περιοχών.

Η σχέση «ένα γονίδιο → μία πρωτεΐνη → μία λειτουργία του οργανισμού» είχε αρχικά θεωρηθεί γενικής ισχύος, έχοντας εντοπιστεί από μελέτες μικροβιακών (προκαρυωτικών) γονιδιωμάτων. Αποδεικνύεται όμως ανεπαρκέστατη για την περιγραφή της σχέσης γονοτύπου-φαινοτύπου των πολυκύτταρων οργανισμών. Εδώ πολύ συχνά παρατηρείται ένα γονίδιο να εμπλέκεται στον καθορισμό πολλών λειτουργιών, ενώ τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά των οργανισμών είναι «πολυγονιδιακά». Γενικό είναι το φαινόμενο του «γενετικού πλειοτροπισμού», όπου ένα γονίδιο σε διαφορετικούς ιστούς, σε διαφορετικά αναπτυξιακά στάδια ή σε διαφορετικούς οργανισμούς συχνά έχει εντέλως διαφορετική δράση. Π.χ. μεταλλάξεις στο γονίδιο BRCA1 στον άνθρωπο οδηγούν σε καρκίνο του μαστού, ενώ στο ποντίκι σε βλάβη στην ανάπτυξη των γονάδων. Τα λεγόμενα «ομοιωτικά» γονίδια εμφανίζονται σε τεράστιο εύρος οργανισμών, από τον άνθρωπο και τις σαύρες ως τα έντομα αλλά και τα φυτά. Αυτά τα γονίδια ενεργοποιούνται κατά ομάδες (clusters), εμπλεκόμενα σε σημαντικά γεγονότα της ανάπτυξης του εμβρύου. Στα σπονδυλωτά καθορίζουν κατά τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης το βασικό σωματικό πρότυπο κατά μήκος της σπονδυλικής στήλης, ενώ επανενεργοποιούνται κατά το σχηματισμό των άκρων, στων οποίων τη διαμόρφωση επίσης έχουν καθοριστική σημασία. Εμπλέκονται ακόμη στο σχηματισμό των πετρών των εντόμων, και ενώ είναι τα κατεξοχήν μορφογενετικά γονίδια των άκρων, εντούτοις μας έχουν κληρονομηθεί από έναν κοινό πρόγονο (κοινό πρόγονο του ανθρώπου, της φρουτόμυγας και της ορτανσίας), ο οποίος δεν είχε άκρα...

Κατά τη διάρκεια της «μοριακής επανάστασης» στη βιολογία, κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες, η προσοχή στράφηκε ιδιαίτερα στον γονιδιακό ντετερμινισμό. Αυτός έχει οδηγήσει ορισμένους εξελικτικούς βιολόγους σε μια «υπερεκτίμηση» του ρόλου των γονιδίων ως «μοναδιαίων» παραγόντων, των οποίων οι οργανισμοί αποτελούν τους συνδυασμούς. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, κάθε οργανισμός αποκομίζει από κάθε γονίδιο ένα καθορισμένο πλεονέκτημα ή μειονέκτημα όσον αφορά την επιβίωση. Ένας διάσημος εκπρόσωπος αυτής της άποψης, ο Ρ. Ντῶκινς⁷, υποστηρίζει μάλιστα ότι είμαστε «τα άγαρμπα ρομπότ των οποίων τα γονίδια δημιουργήσαν σώμα και νου», ανάγοντας τόσο την επιλογή όσο και την εξέλιξη στην επικράτεια των γονιδίων. Σε αυτή την προσέγγιση αντιτίθεται ο Σ. Τζ. Γκουλντ⁸ τονίζοντας ότι:

- τα γονίδια μεταλλάσσονται,

- οι οργανισμοί επιλέγονται,
- τα είδη εξελίσσονται.

Εδώ ο οργανισμός νοείται όχι ως το πρόσκαιρο όχημα μιας πλειάδας ανεξάρτητων γονιδίων, αλλά ως το προϊόν αλληλεπίδρασης του συνόλου του γονιδιώματος με επιγενετικούς παράγοντες και το περιβάλλον (βλ. πιο κάτω) και τονίζεται ότι η δράση της φυσικής επιλογής αφορά τον οργανισμό στην ολότητά του. Οι μακρομεταλλάξεις και ο γενετικός πλειοτροπισμός που αναφέραμε, καθώς και όσα συνοπτικά περιλαμβάνονται στις επόμενες παραγράφους, κατά τον Γκούλντ και άλλους θεωρητικούς και εξελικτικούς βιολόγους (Άτλαν⁹, Λιουόντιν^{10, 11} κ.ά.), καταδεικνύουν την ανεπάρχεια του μοριακού ντετερμινισμού και της αναγωγής των χαρακτηριστικών των οργανισμών σε μεμονωμένα κάθε φορά γονίδια να περιγράψουν την βιολογική πραγματικότητα.

Όπως υπογραμμίζουν οι συγγραφείς αυτοί, ο πέραν του γονιδιώματος (επιγενετικός όπως αποκαλείται) καθορισμός των οργανισμών και κατ' επέκταση των ειδών, από στοιχεία του εσωτερικού (κυτταρικού και οργανισμικού) περιβάλλοντος, καθώς και από μορφές μη γονιδιωματικής κληρονομικότητας, είναι συνεχώς παρών, διαπλεκόμενος με τη δράση των γονιδίων. «Επιγενετικά δίκτυα» αλληλεπιδράσεων καθορίζουν την επιλεκτική έκφραση γονιδίων, αδρανοποιώντας το μεγαλύτερο μέρος του γονιδιώματος σε κάθε κυτταρικό τύπο. Έτσι, πρωτεΐνες και άλλοι παράγοντες τροποποιούν την αναγνωσιμότητα του γονιδιωματικού κειμένου με κυτταρικά κληρονομήσιμο τρόπο κατά τη διάρκεια ζωής ενός οργανισμού, αλλά ενίοτε και με τρόπο κληρονομήσιμο στους απογόνους μέσω παρέμβασης στα γεννητικά κύτταρα. Ειδικές πρωτεΐνες δεσμεύονται σε συγκεκριμένες θέσεις στα χρωματοσώματα, ενώ άλλες τροποποιούν επιλεκτικά (μεθυλιώνουν) ορισμένα νουκλεοτίδια. Ως αποτέλεσμα έχουμε δερματικά ή ηπατικά κ.λπ. κύτταρα ενός οργανισμού να δίνουν ως απογόνους ομοειδή τους κύτταρα, παρόλο που όλα φέρουν ταυτόσημο γονιδίωμα. Το κυτταρικό περιβάλλον του μητρικού ωαρίου καθορίζει συχνά σημαντικά χαρακτηριστικά της ανάπτυξης του εμβρύου χωρίς τη συμμετοχή του εμβρυακού γονιδιώματος. Ένα άλλο πρόσφατο παράδειγμα των δυνατοτήτων εξω-γονιδιωματικών παραγόντων να τροποποιούν την έκφραση του γονιδιώματος δίνουν οι εφαρμογές της κλωνοποίησης. Εκεί βλέπουμε ότι ένας πυρήνας σωματικού κυττάρου, που όπως έχουμε πει κανονικά δεν μπορεί να εκφράσει παρά μόνο το μέρος εκείνο της πληροφορίας που αφορά το είδος κυττάρων από όπου προέρχεται, τοποθετούμενος στο κυτταροπλασματικό περιβάλλον του ωαρίου «επαναπρογραμματίζεται» ώστε το σύνολο του γονιδιώματος που φέρει να καθίσταται και πάλι ενεργό και να παράγει έναν ολόκληρο οργανισμό. Με βάση αυτό και άλλα ανάλογα γεγονότα, ο Άτλαν⁹ αναπτύσσει στο βιβλίο του που παραθέτουμε, καθώς και σε άλλα σημεία του έργου του, τις επιφυλάξεις του για το εύστοχο της, ευρύτατα χρησιμοποιούμενης, μεταφοράς που παρομοιάζει το DNA ενός οργανισμού με ένα «γενετικό πρόγραμμα» που περιλαμβάνει εντολές προς εκτέλεση από τον (θεωρούμενο παθητικό) κυτταρικό μηχανισμό. Ο Άτλαν υποστηρίζει ότι η σχέση του γονιδιώματος (πρωτίστως του ευκαρυωτικού) με το συνολικό κύτταρο διαμεσολαβείται από ένα δίκτυο επιγενετικών σχέσεων, σχηματίζοντας αλληπάλληλους αναδραστικούς βρόχους μέσω των οποίων το γονιδίωμα «διαλέγεται» με τον φαινότυπο διαμορφώνοντάς τον αφενός, ενώ αφετέρου εκτίθενται επιλεκτικά στη μεταγραφή και μετάφραση μόνο τα τμήματά του που αντιστοιχούν στην κατάσταση (state) του κυττάρου.

Η σημασία των επιγενετικών παραγόντων έγινε ιδιαίτερα εμφανής με την ανακάλυψη των prions τα οποία αποτελούν καθαρά πρωτεϊνικής σύστασης μολυσματικούς παράγοντες, υπεύθυνους για ποικιλία ασθενειών μεταξύ των οποίων και αυτής των «τρελών αγελάδων». Τα prions προκαλούν ασθένειες που συνδέονται με την λάθος αναδίπλωση ενός πρωτεϊνικού μορίου. Η μεταδοτικότητα προκαλείται σε έναν αρχικά υγιή οργανισμό όταν εξωγενή μόρια πρωτεϊνών με τη λάθος αναδίπλωση εφάπτονται των (υγιών) αντίστοιχων μορίων του οργανισμού, «μεταδίδοντάς» τους τη διαμόρφωσή τους και μαζί τη μη λειτουργικότητά τους, αλλά και τη δυνατότητα να αλλοιώνουν την ορθή αναδίπλωση και άλλων ομοειδών μορίων. Αυτό είναι μια ακραία περίπτωση (με αυτοκαταλυτικό εδώ χαρακτήρα), της ιδιότητας μεγάλων ομάδων πρωτεϊνών, των λεγόμενων συνοδών (chaperons), να υποβοηθούν άλλα πρωτεϊνικά μόρια ώστε αυτά να υιοθετήσουν τον λειτουργικά ορθό τρόπο αναδίπλωσης. Σήμερα είναι πλέον αποδεκτό ότι, κατά κανόνα, η επίτευξη της λειτουργικά ορθής τρισδιάστατης αναδίπλωσης πρωτεϊνικών μορίων δεν γίνεται αυτόματα ως συνέπεια της αμινοξικής τους ακολουθίας αλλά μόνο όταν παράγονται υπό συγκεκριμένες συνθήκες ενδοκυτταρικού μικροπεριβάλλοντος, συχνά μόνο με τη βοήθεια καταλλήλων chaperons. Τούτο δημιουργεί μία συμπληρωματική παρακαταθήκη κυτταρικής μνήμης, παράλληλης με τη γονιδιοματική και με σαφώς επιγενετικό χαρακτήρα. Μπορούμε να πούμε βάσει των παραπάνω και πολλών άλλων ενδείξεων ότι η επιγένεση, η οργανισμική πολυπλοκότητα και η αυτοοργάνωση (Strohman 1997) αποτελούν στοιχεία συμπληρωματικά με το γονιδίωμα, και όχι αναγώγιμα στο γονιδίωμα.

Ο Ρ. Λιούντιν^{10, 11}, ο οποίος τονίζει τον διαλεκτικό χαρακτήρα της σχέσης μεταξύ γονιδιώματος, οργανισμού και περιβάλλοντος, υπογραμμίζει τον κατασκευαστικό χαρακτήρα των οργανισμών, καθώς αυτοί δομούν σε μεγάλο βαθμό το φυσικό περιβάλλον. Το περιβάλλον επιδρά μέσω της φυσικής επιλογής στη διαμόρφωση των ειδών, όμως τούτο συμβαίνει κατά Λιούντιν μέσω αναδραστικών βρόχων όπου οι οργανισμοί δεν «λύνουν» απλώς τα προβλήματα που «θέτει» το περιβάλλον, αλλά τα οικοσυστήματα συνεξελίσσονται στο σύνολό τους. Η ίδια η αλλαγή της σύστασης της ατμόσφαιρας με την εμφάνιση του O_2 , λόγω της δράσης των φωτοσυνθετικών οργανισμών, και η συνεπακόλουθη εξελικτική πίεση που η νέα βιογενής ατμόσφαιρα άσκησε, με αποτέλεσμα την εξέλιξη των αερόβιων οργανισμών, είναι ένα κορυφαίο παράδειγμα. Ο Λιούντιν μελετά πλήθος άλλων παραδειγμάτων όπου το περιβάλλον «κατασκευάζεται» από τους οργανισμούς που το εγκατοικούν. Τέτοια είναι η περίπτωση των δασικών συστημάτων, όπου το υπέδαφος κυριολεκτικά δομείται από τη δράση των ριζικών συστημάτων των φυτών ενώ ο τύπος της σκίασης οδηγεί στην επιλογή των φυτών που θα μπορέσουν να αναπτυχθούν εκεί. Στο πλαίσιο των αλληλεπιδράσεων περιβάλλοντος οργανισμού περιλαμβάνονται εξαιρετικά σύνθετες περιπτώσεις, όπως αυτή εντόμων που σε σταθερούς βιότοπους ακολουθούν αφυλετική αναπαραγωγή, αλλά μεταπίπτουν στη φυλετική αναπαραγωγή όταν το περιβάλλον αλλάζει προς οιαδήποτε κατεύθυνση. Τούτο συμβαίνει γιατί η αφυλετική αναπαραγωγή διαφυλάσσει αποτελεσματικά γονότυπους που έχουν ήδη επιλεγεί για δεδομένο περιβάλλον, ενώ μετά από κάθε αλλαγή ο οργανισμός ωφελείται αν παραχθεί εκ νέου ποικιλότητα μέσω του ανασυνδυασμού γενετικού υλικού από διαφορετικά άτομα, πάνω στην οποία θα δράσει ξανά η επιλογή.

Ο γράφων, μη ως φιλόσοφος, δεν θα επιχειρήσει εδώ τη συστηματική μεταφορά του πο-

λύ σημαντικού διαλόγου που έχουν προκαλέσει στο χώρο της φιλοσοφίας οι συνταρακτικές βιολογικές ανακαλύψεις των τελευταίων δεκαετιών. Πληθώρα αξιολογών βιβλίων άπτονται αυτής της προβληματικής, κάποια από τα οποία τα έχουμε ήδη αναφέρει και μερικά έχουν γραφεί από πρωτεργάτες της επανάστασης της μοριακής βιολογίας (για παράδειγμα βιβλία των Ζ. Μονό, Φ. Ζακόμπ κ.ά.). Σημαντικές αναφορές σε εννοιολογικά προβλήματα που ανακύπτουν στη σύγχρονη βιολογία εξετάζόμενα από τη σκοπιά της διαλεκτικής φιλοσοφίας περιλαμβάνονται στο πρόσφατο βιβλίο του Εντύχη Μπιτσάκη¹², στο οποίο παραπέμπουμε, καθώς και σε σχετική μελέτη που ανασκοπεί ιστορικά την εξέλιξη της βιολογίας του 20ού αιώνα, της Λαοκρατίας Λάκκα¹³.

Ο Άτλαν⁹ (σ. 68) υπογραμμίζει ότι η προσέγγισή του είναι άκρως μηχανιστική «...αναγνωρίζοντας ουσιαστικά ότι η ζωή δεν υπάρχει ως αντικείμενο επιστημονικής μελέτης δεδομένου ότι οι μηχανισμοί της ανάγονται σε χημικές αλληλεπιδράσεις». Στη δήλωση αυτή του Άτλαν, και σε άλλα σημεία του έργου του, διαφαίνεται η φροντίδα να μην χαρακτηριστεί κατ' ελάχιστον ως βιταλιστής. Αυτή είναι κατηγορία που συχνά προσάπτουν συγγραφείς που ευνοούν μια έντονα θετικιστική κατεύθυνση (μοριακός αναγωγισμός / ντετερμινισμός) σε όσους (όπως ο Άτλαν) τονίζουν τη μη αναγωγικότητα στα γονίδια, κρίσιμων πλευρών της λειτουργίας των οργανισμών, καθώς και σε όσους υποστηρίζουν το ενδεχόμενο σημαντικά γεγονότα της εξελικτικής ιστορίας να έχουν συμβεί ως ασυνέχειες μέσω μακρομεταλλάξεων. Ο Μονό είχε επιτεθεί έντονα στον Πριγκοζίν θεωρώντας υποφώσκοντα βιταλισμό τη σημασία που απέδιδε ο τελευταίος στην αυτοοργάνωση μέσω αναδραστικών μηχανισμών. Παρόμοια είναι η κριτική που ασκεί ο Ντώκινς⁷ σε βιολόγους όπως ο Λιονόντιν και ο Γκούλντ που αποδίδουν ιδιαίτερη σημασία στο ρόλο των «αλμάτων» μέσω μακρομεταλλάξεων κατά την εξέλιξη.

Ο Λιονόντιν¹¹ (σ. 41 κ.ε.) υιοθετεί μια διαλεκτική άποψη για τη φύση των εμφύων, «ανοίγοντας μέτωπο» προς δύο κατευθύνσεις. Κριτικάρει την αντιμετώπιση του κόσμου ως άρρηκτη ολότητα και διαβλέπει μια μορφή μυστικισμού στο να θεωρείται ο κόσμος ως ένας γιγάντιος οργανισμός ικανός να αυτοριθμίζεται. Εντούτοις, αρνείται να αποδεχθεί την επικρατούσα σήμερα άποψη ότι ο κόσμος συγκροτείται από μέρη τα οποία είναι δυνατόν να απομονωθούν και οι ιδιότητές τους να μελετηθούν ξεχωριστά. Μάλιστα αναζητά τις κοινωνικές ρίζες αυτών των δύο αντιλήψεων, εντοπίζοντας στη μεν πρώτη στοιχεία φεουδαρχικής ιδεολογίας (θα λέγαμε μάλλον γενικότερα μιας αρχαϊκής μαγικοθρησκευτικής αντίληψης για τον κόσμο), στη δε δεύτερη αντικατοπτρισμό της σύγχρονης ανταγωνιστικής ατομιστικής επιχειρηματικής κοινωνίας. Ο Λιονόντιν συχνά στο έργο του τονίζει τη μη αναγωγικότητα των πλέον πολύπλοκων από τα διαφορετικά επίπεδα οργάνωσης και λειτουργίας της φύσης στα «απλούστερα», άποψη που αποτελεί βασική θέση της διαλεκτικής φιλοσοφίας για τη φύση (βλ. επίσης Ε. Μπιτσάκη¹² π.χ. σ. 13, 315).

Η δυσκολία εφαρμογής απλών αναγωγιστικών μοντέλων στη βιολογία, εκτός από τους παράγοντες που έχουμε αναφέρει μέχρι τώρα, σχετίζεται και με την ιδιότητα των οργανισμών να είναι «ενδιαμέσου μεγέθους», καλύπτοντας, οι ίδιοι και τα μέρη που τους συναποτελούν (μακρομόρια, οργανίδια, κύτταρα, κυτταρικά συγκροτήματα, ιστοί, όργανα κ.λπ.), μια συνεχή κλίμακα μηκών, που εκτείνεται σε πολλές τάξεις μεγέθους. Τούτο τους κάνει εσωτερικά ετερογενείς κατά μη τετριμμένο τρόπο, ιδιότητα που σχετίζεται στενά με τις λει-

τοιργίες τους. Να θυμίσουμε ότι στο πεδίο της φυσικής των μακροσκοπικών φαινομένων (φυσική στερεού σώματος, αμόρφων υλικών, ρευστού, πλάσματος κ.ά.), εν γένει, η μικρο-κλίμακα είναι της τάξεως μεγέθους των μορίων, όπου ισχύει η μηχανική περιγραφή, η οποία βασίζεται σε ποσότητες όπως οι θέσεις και οι ορμές των σωματιδίων. Η μακρο-κλίμακα αντίστοιχα, εντοπίζεται στην τάξη μεγέθους όπου ορίζονται ποσότητες όπως θερμοκρασίες, πιέσεις κ.λπ., και όπου εφαρμόζεται η θερμοδυναμική περιγραφή. Αντίθετα, στους οργανισμούς, αυτά τα δύο επίπεδα περιγραφής δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν και, κατά συνέπεια, η πολυπλοκότητα του συστήματος δεν γίνεται να απομακρυνθεί μέσω της λεγόμενης αδρομερούς (coarse-grained) αναγωγής, που παράγει τις θερμοδυναμικές ποσότητες από τις μηχανικές «μικροκαταστάσεις» του.

Επίσης, οι οργανισμοί βρίσκονται συνεχώς σε πολύπλοκες σχέσεις με άλλα ετερογενή συστήματα. Εμφανίζουν το καθολικό χαρακτηριστικό της χαλαρότητας των ορίων εσωτερικού-εξωτερικού, ενώ παράλληλα, σε αντίθεση με το σύνολο του υπόλοιπου φυσικού κόσμου, η απόδοση ξεχωριστής ταυτότητας σε κάθε οργανισμό (αυτοποίηση¹⁴) είναι συστατικό στοιχείο της συγκρότησης των βιοσυστημάτων και βεβαίως αδιαχώριστη από τον «ιστορικό» τους χαρακτήρα στον οποίο έχουμε κατ' επανάληψη αναφερθεί.

Όλα τα παραπάνω φαίνεται να συγκλίνουν στην ανάγκη μελέτης των οργανισμών και του φαινομένου της ζωής εν γένει, με προσοχή στις ιδιαιτερότητες που το χαρακτηρίζουν. Η ολοένα διευρυνόμενη γνώση του φυσικοχημικού και μοριακού υποστρώματος της ζωής δεν σημαίνει τη συνολική υπαγωγή της στα πεδία αυτά, αλλά την αναγνώρισή της ως «αναδυνάμενης ιδιότητας» που προέκυψε στους κόλπους πολύπλοκων συστημάτων, που, χωρίς να πάψουν να είναι και φυσικοχημικά, ανέπτυξαν στον εξελικτικό χρόνο τον χαρακτήρα του εμβίου. Κάθε οργανισμός, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από ιδιότητες όπως η ιστορικότητα, η τελεονομία, η συνύπαρξη φαινοτύπου/γονοτύπου, η δόμηση σε ετάλληλες κλίμακες μεγέθους λειτουργικά διασυνδεδεμένες (η εγγενής ιεραρχική του οργάνωση), η εκτεταμένη αναδραστικότητα και η χαλαρότητα των ορίων μεταξύ εσωτερικού-εξωτερικού, για να υπενθυμίσουμε μόνο κάποιες από τις όψεις του φαινομένου της ζωής στις οποίες έχουμε αναφερθεί στο παρόν κείμενο.

Σημειώσεις

1. Κ. Καστοριάδης, *Διάλογοι*, Αθήνα, Ύψιλον/βιβλία, 2001, σ. 32.
2. Ι. Αλμυράντης (Ι), «Το γενετικό μήνυμα ως κείμενο», *Οντοπία* 42 (2000), σ. 45, και (ΙΙ) «Η ανάδυση της ζωής: Σύμπτωση ή αυτοοργάνωση;», *Οντοπία* 50 (2002), σ. 37.
3. Α.Ι. Οπάωιν, *Η προέλευση της ζωής*, έλλ. μτφ. από μεταγενέστερη έκδοση του φυσικού πρωτοτύπου, εκδ. «Σύγχρονο Βιβλίο», 1962.
4. Την εκδοχή αυτή υιοθετεί ο Jacques Monod στο βιβλίο του *Τίξη και αναγκαιότητα*, Αθήνα, Κέδρος-Ραπτά, 1997.
5. F. Dyson, *Προελεύσεις της Ζωής*, Αθήνα, Σινάωμα, 1997.
6. Κ.Ε. Σέκερη, «Το φαινόμενο της Ζωής: Από το αρχέγονο ζήτημα στους πολυεπίπεδους οργανισμούς», *Οντοπία* 50 (2002), σ. 45.
7. R. Dawkins, *Το Εγωϊστικό Γονίδιο*, Αθήνα, Σινάωμα, 1998, και *Ο Τικλός Ωρολόγοποιος*, Αθήνα, Κάτοπτρο, 2001.

8. S.J. Gould, *The Panda's thump*, Penguin Books, 1980.
9. H. Atlan, *Το τέλος της παντοκρατορίας των γονιδίων*, Αθήνα, Leader Books, 2003.
10. R. Lewontin, *Η τριπλή έλξη: Γονίδιο, οργανισμός, περιβάλλον*, Αθήνα, Σύνταγμα, 2001.
11. R. Lewontin, *Η βιολογία ως ιδεολογία*, Αθήνα, Σύνταγμα, 2000.
12. Ε. Μπιτοάκη, *Η φωνή στη διαλεκτική φιλοσοφία*, πρόσφατη αναθεωρημένη έκδοση, Ελληνικά Γράμματα, 2003.
13. Α. Λάζκα, «Το παραδόξο του βιολογικού παραδείγματος», *Οιτιπία* 50 (2002), σ. 95.
14. H.R. Maturana, F.J. Varela *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Boston Studies in the Philosophy of Science, 1991.

Βιβλιογραφία

- Alberts B. et al. (1994), *The Molecular Biology of the Cell*, Garland Pub. Inc., N. York & London.
- Brenner S. et al. (1993), «Characterization of the pufferfish (Fugu) genome as a compact model vertebrate genome», *Nature* 18, 265-8.
- Decker P. (1974), «Origin of molecular asymmetry through amplification of stochastic information (noise) in bioids. open systems which can exist in several steady states», *J. Mol. Evol.* 4, 49-65.
- Dickerson R.E. (1978), «Chemical evolution and the origin of life», στο *Evolution, a Scientific American Book*, W.H. Freeman and Co, San Francisco.
- Eigen M., Schuster P. (1979), *The Hypercycle. A principle of natural self-organisation*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Ferris J.P., Sanchez R.A., Orgel L.E. (1968), «Studies in prebiotic synthesis. III. Synthesis of pyrimidines from cyanoacetylene and cyanate», *J. Mol. Biol.* 33, 693-704.
- Fox S.W. (1965), *The origins of prebiological systems and of their molecular matrices*, Academic Press, New York.
- Holmquist G.P. (1989), «Evolution of chromosome bands: molecular ecology of noncoding DNA», *J. Mol. Evol.* 28, 469-86.
- Kaufmann S. (1996), «What is life?: was Schrödinger right?», στο M.P. Murphy and L.A.J. O'Neill (επιμ.) *What is Life? The Next Fifty Years*, Cambridge U.P.
- Kondepudi D.K., Nelson G.W. (1985), «Weak neutral currents and the origin of biomolecular chirality», *Nature* 314, 438-441.
- Miller S.L. (1953), «A production of amino acids under possible primitive Earth conditions», *Science* 117, 528-529.
- Miller S.L., Schopf J.W., Lazcano A (1997), «Oparin's "Origin of life": Sixty years later», *J. Mol. Evol.* 44, 351-353.
- Muller H.J. (1926), «The gene as the basis of life», *Proc. Int. Congr. Plant Sci.* 1, 897-921.
- Nicolis G., Prigogine I. (1989), *Exploring Complexity*, W.H. Freeman & Co.
- Oparin A.I. (1938), *The origin of life*, MacMillan, New York.
- Oro J. (1960), «Synthesis of adenine from ammonium cyanide», *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2, 407-412.
- Poole A.M., Jeffares D.C., Penny D. (1998), «The path from the RNA world», *J. Mol. Biol.* 46, 1-17 & 18-36.
- Schopf J.W. ((1978), «The evolution of the earliest cells», στο *Evolution, a Scientific American Book*, W.H. Freeman and Co, San Francisco.
- Strohmeier R.C. (1997), «Epigenesis and complexity. The coming Kuhnian revolution in biology», *Nature Biotechnology* 15, 194-200.
- Urey H.C. (1952), «On the early history of earth and the origin of life», *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 38, 351-363.
- Vellai T., Vida G. (1999), «The origin of eukaryotes: the difference between prokaryotic and eukaryotic cells», *Proc. Biol. Sci.* 266, 1571-7.