

## Η ανάδυση της ζωής. Σύμπτωση ή αυτοοργάνωση;

**Η** προέλευση της ζωής, πολύ πριν γίνει αντικείμενο επιστημονικής αναζήτησης, είχε εξάψει την ανθρώπινη φαντασία και προκάλεσε τη δημιουργία πολλών «κοσμογονικών μύθων», που ωστόσο, ακόμα και σήμερα, μας γοητεύουν. Αργότερα, έγινε αντικείμενο στοχασμού για τολμηρούς πρωτοπόρους που προσπάθησαν να ερμηνεύσουν φυσιοκρατικά τον κόσμο, από τους Ίωνες φιλοσόφους ως την εποχή της ανάπτυξης της σύγχρονης επιστήμης. Σήμερα, το γεγονός της εμφάνισης της ζωής στο νεαρό πλανήτη Γη παραμένει ένα από τα πλέον δυσπρόσιτα προβλήματα των βιολογικών επιστημών.

Εδώ θα επιχειρήσουμε μια σύντομη και κατά το δυνατόν απαλλαγμένη από «τεχνικές» λεπτομέρειες ανασκόπηση των επικρατουσών αντιλήψεων για την προέλευση των ζωντανών οργανισμών, προσπαθώντας να απαντήσουμε, όσο είναι δυνατόν, στο ερώτημα του τίτλου. Αυτό το ερώτημα παρατέμνει εμφανώς στο βιβλίου του κορυφαίου γάλλου βιολόγου Jacques Monod, *Η Τύχη και η Αναγκαιότητα*<sup>1</sup>, που γράφτηκε το 1970. Εκεί ο Monod φαίνεται να ευνοεί περισσότερο την εκδοχή της προέλευσης της ζωής από ένα μοναδικό συμβάν, εξαιρετικής απιθανότητας. Τούτο θα δημιουργήσει, κατά μία ανεπανόρθωτη ίσως σύμπτωση, τον κοινό πρόγονο όλων των οργανισμών, ικανό ήδη να επιτελεί τις βασικές λειτουργίες του εμβίου και οι απόγονοι του οποίου θα ήταν επιδεικτικοί διαφοροποίησης και εξέλιξης.

Όπως ισχυρίζεται ένας από τους πατέρες της σύγχρονης «νεοδαρβινικής» θεωρίας για τη βιολογική εξέλιξη<sup>2</sup>, ο Theodosius Dobzhansky, «τίποτα δεν έχει νόημα στη Βιολογία εάν δεν το δούμε υπό το φως της εξέλιξης». Μήπως τότε η έννοια της εξέλιξης θα μπορούσε να επεκταθεί και στα γεγονότα που οδήγησαν στην εμφάνιση των ίδιων των πρώτων έμβιων συστημάτων; Ως τέτοια συστήματα ας θεωρήσουμε τους στοιχειώδεις οργανισμούς, που κατά κάποιο τρόπο διακρίνονταν τόσο από το περιβάλλον τους όσο και από τα άλλα παρόμοια συστήματα, ενώ βέβαια θα πρέπει να διέθεταν κάποιο είδος μεταβολισμού και την ικανότητα αναπαραγωγής. Ας θυμίσουμε επιγραμματικά ότι η σύγχρονη εξελικτική θεωρία βασίζεται στην τυχαία (στοχαστική) τροποποίηση των κληρονομούμενων χαρακτηρισμών (γονιδίων) λόγω της όχι απόλυτα πιστής αντιγραφής τους κατά την αναπαραγωγή. Αυτή η ιδιότητα των οργανισμών οδηγεί σε επιλογή των πλέον προσαρμοσμένων ατόμων –δηλαδή ατόμων που παράγουν το μεγαλύτερο αριθμό βιώσιμων απογόνων– και, μέσω αυτής, σε

<sup>1</sup> Ο Γιάννης Αλμυράντης είναι δάσκαλος Χημικός, ερευνητής στο Ινστιτούτο Βιολογίας ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

<sup>2</sup> Ο συγγραφέας επιθυμεί να ευχαριστήσει θερμά το φίλο βιολόγο Σπύρο Μανουσέλη, που διάβασε το χειρόγραφο, για τις καίριες παρατηρήσεις του, και τον καθηγητή κ. Ιωάννη Νικόλη, που τον ενημέρωσε για την εργασία του Freeman Dyson.

τροποποίηση του φαινοτύπου (δηλαδή των χαρακτηριστικών) του είδους, καθώς και στη δημιουργία νέων ειδών.

Στην υπόθεση της προέλευσης της ζωής ως προϊόν προβιωτικής εξέλιξης συνέβαλαν σημαντικά με το έργο και τις ιδέες του ο Ilya Prigogine και οι συνεργάτες του της «Σχολής των Βρυξελλών», καθώς και άλλοι μελετητές (Alan Turing, Ludwig von Bertalanffy, Hermann Haken κ.ά.). Έχειδειχθεί ότι συστήματα που διαθέτουν αναδραστικούς μηχανισμούς μπορούν να οδηγηθούν σε αυτοοργάνωση<sup>3</sup>. Τέτοια συστήματα είναι ορισμένες πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις, όπου τα «προϊόντα» μπορούν να δράσουν ανασταλτικά ή καταλυτικά για την ίδια τους την παραγωγή, όταν βρίσκονται μακριά από τη θερμοδυναμική ισορροπία (καταναλώνοντας ύλη και ενέργεια). Η αυτοοργάνωση εκφράζεται ως αυτόματη εμφάνιση χωρικών ανομοιομορφιών με απλούστερη τη δημιουργία επαναλαμβανόμενων σχημάτων, σπειρών κ.λπ., χρονικής ρυθμικότητας, «χαοτικής» συμπεριφοράς και αυτοόμοιων (fractal) δομών. Ο ίδιος ο I. Prigogine έχει χαρακτηρίσει το έργο του ως μεταφορά ιδεών που προέρχονται από τη Βιολογία στο χώρο της Φυσικής και της Χημείας<sup>4</sup>. Αντίστοιχα, η προβιωτική εξέλιξη μπορεί να συνίσταται σε μία συσσώρευση βαθμίδων αυτοοργάνωσης φυσικοχημικών σχηματισμών προϊούσας πολυπλοκότητας, εφόσον τα αναπτυσσόμενα χαρακτηριστικά οδηγούν σε καλύτερη αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών «δυσκολιών», όπως συμβαίνει και κατά τη βιολογική εξέλιξη. Στο τέλος αυτής της παρουσίασης, θα δούμε ένα «μοντέλο» για την προβιωτική εξέλιξη που οφείλεται στον Stuart Kauffman και εμφανίζει σε μεγάλο βαθμό χαρακτηριστικά αυτοοργανούμενου συστήματος.

Τα κλασικά πειράματα του Louis Pasteur, που κατέδειξαν την αδυναμία δημιουργίας ζωής από άβιες πρώτες ύλες (σε αποστειρωμένο περιβάλλον), φαίνεται ότι καθυστέρησαν την πειραματική μελέτη της προέλευσης της ζωής, καθώς έπεισαν τους βιοχημικούς της εποχής για το μάταιο αυτής της αναζήτησης. Ο ρώσος βιοχημικός A.I. Oparin<sup>5</sup> το 1924 διατύπωσε μια θεωρία που έγινε κλασική, ανάγοντας την προέλευση των σημερινών κυττάρων σε κυστιδία που περιέκλειαν μέσα σε πρωτόγονες μεμβράνες τα πρωταρχικά βιομόρια. Επίσης, εντόπισε ως προϋπόθεση για την ανάπτυξη της ζωής μία ατμόσφαιρα όπου θα απουσίαζε το ελεύθερο οξυγόνο (μία ιδέα που συχνά αποδίδεται εσφαλμένα στο βρετανό βιοχημικό J.B.S. Haldane). Οι S.L. Miller και H.C. Urey το 1952, και πολλοί άλλοι ερευνητές μετά από αυτούς<sup>6</sup>, έκαναν πειράματα μίμησης των συνθηκών που πιστεύεται ότι επικρατούσαν στη γη κατά την περίοδο που αναπτύχθηκε η ζωή. Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί προσομοίωσης της αρχικής «αναγωγικής» ατμόσφαιρας, όπου απουσίαζε το οξυγόνο και αφθονούσαν το υδρογόνο, το μεθάνιο, η αμμωνία, οι υδρατμοί, το άζωτο, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, πάνω από θερμό νερό σε ένα κλειστό σύστημα που το διέτρεχαν ηλεκτρικοί σπινθήρες ή υπεριώδης ακτινοβολία. Μετά από αρκετές ημέρες, η υγρή φάση στη συσκευή αρχίζει να αποκτά σύνθεση «χλιαρής αραιής σούπας», πιθανόν παρεμφερούς με τον πρωταρχικό ωκεανό. Στο μίγμα αυτό ανιχνεύθηκαν διάφορα μικρά οργανικά μόρια, μεταξύ των οποίων και πληθώρα αμινοξέων, πολλά από τα οποία συμμετέχουν στη σύνθεση των κυριότερων συστατικών των σημερινών οργανισμών (πρωτεΐνες). Όπως αναμενόταν όμως, οι ουσίες αυτές παρήχθησαν σε πλήθος «ισομερών» και πάντα σε ρακεμικά μίγματα, όταν επρόκειτο για «οπτικά ενεργές» ενώσεις.

Να θυμίσουμε ότι, αν το κατοπτρικό είδωλο ενός μορίου αποτελεί διαφορετικό μόριο (όπως το κατοπτρικό είδωλο ενός αριστερού χεριού είναι ένα δεξιό χέρι), στο ρακεμικό μίγμα οι δύο «κατοπτρικές ενώσεις» συμμετέχουν εξίσου. Είναι γνωστό ότι οι πρωτεΐνες και τα άλλα βιολογικά μακρομόρια που συγκροτούν τους οργανισμούς περιέχουν πάντα μόνο τον έναν από τους δύο αυτούς τύπους μορίων.

Ενώ όμως μόρια συγγενή των πρωτεϊνών (με τον παραπάνω περιορισμό) είναι δυνατόν να παραχθούν σε πειράματα προσομοίωσης του προβιωτικού περιβάλλοντος, δεν ισχύει το ίδιο και με τα νουκλεϊνικά οξέα (RNA, DNA), που είναι το άλλο θεμελιώδες συστατικό των έμβιων όντων, λειτουργώντας κυρίως ως φορείς της κληρονομικότητας. Παρόλο που έγινε δυνατόν να παραχθούν σε πειράματα προσομοίωσης προβιωτικών συνθηκών κάποια από τα μονομερή τους (νουκλεοτιδία), τα ίδια τα μακρομόρια, και κυρίως το RNA, δεν συντίθενται καθόλου ικανοποιητικά και συνήθως είναι ασταθή σ' αυτές τις συνθήκες. Δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε ότι οι πραγματικές συνθήκες της προβιωτικής γης, με όλη την ποικιλότητά τους (όπως η παρουσία διαφόρων ορυκτών συστατικών που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως καταλύτες και σταθεροποιητές σε πολύπλοκες φυσικοχημικές διαδικασίες) σε συνδυασμό με το μακρό «χρόνο επίωσης» που είχε το σύστημα στη διάθεσή του, είναι αδύνατον πρακτικά να επαναληφθούν σε ένα πείραμα.

Οι έμβιοι οργανισμοί αποτελούνται από πρωτεΐνες (και δευτερευόντως άλλους τύπους βιομορίων), που είναι κυρίως υπεύθυνες για τις δομικές και λειτουργικές πλευρές των οργανισμών. Η εκπληκτική ικανότητα των πρωτεϊνών να δρουν ως βιολογικοί καταλύτες είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το σύνολο των μεταβολικών ιδιοτήτων των οργανισμών. Αντίθετα, η ιδιότητα των κυττάρων να παράγουν «όμοια» μ' αυτά αντίγραφα (αναπαραγωγή) εξαρτάται από την ικανότητα ορισμένων μακρομορίων να «αυτο-αντιγράφονται», αφού έτσι εφοδιάζονται οι απόγονοι με την ίδια ακριβώς παρακαταθήκη «γενετικών πληροφοριών». Αν και στους υπάρχοντες σήμερα οργανισμούς η μοριακή αυτο-αντιγραφή διαμεσολαβείται πάντα από πρωτεΐνες, παραμένει αποκλειστικά ιδιότητα των «μορίων φορέων πληροφορίας», που είναι τα νουκλεϊνικά οξέα.

Σε κάθε μοριακή αλυσίδα πρωτεΐνης, η διαδοχή των μονομερών (αμινοξέων) που την αποτελούν σχηματίζει ένα σύνθετο μοριακό «εργαλείο», ικανό να επιτελεί κατά περίπτωση εξαιρετικά σύνθετες και εξειδικευμένες δράσεις (δημιουργία ή αποικοδόμηση μορίων, μεταφορά μορίων ή ιόντων μέσα από μεμβράνες, μεταφορά μηνυμάτων μέσα στους πολυκύτταρους οργανισμούς κ.ά.). Οι μοριακές αλυσίδες των «χρωματοσωμάτων» (μακρότατων μορίων DNA) αποτελούνται από αλληλουχίες των τεσσάρων νουκλεοτιδίων που η διαδοχή τους κωδικοποιεί για τη σύνθεση όλων των πρωτεϊνών του οργανισμού. Η ανάγνωση αυτού του «γενετικού μηνύματος» γίνεται από υποκυτταρικά οργανίδια, τα «ριβοσώματα», που διαβάζουν «αντίγραφα εργασίας» τμημάτων του χρωματοσώματος, που αυτή τη φορά είναι μακρομόρια ενός λίγο διαφορετικού νουκλεϊνικού οξέως, του RNA (μήνυμα RNA ή mRNA). Για κάθε τριάδα διαδοχικών νουκλεοτιδίων του υπό ανάγνωση μηνύματος προστίθεται το αντίστοιχο αμινοξύ σε ένα υπό σύνθεση μόριο πρωτεΐνης. Οι δυνατές τριάδες νουκλεοτιδίων είναι 64 και υπερεπαρκούν για την κωδικοποίηση των 20 αμινοξέων που απαντούν στις πρωτεΐνες. Ο πίνακας αντιστοίχισης μεταξύ των τριάδων νουκλεοτιδίων

και των αμινοξέων είναι σχεδόν απόλυτα ίδιος για όλους τους οργανισμούς και ονομάζεται *γενετικός κώδικας*.

Η δομή του σύγχρονου γενετικού κώδικα φέρει έντονα τα ίχνη της εξελικτικής του προέλευσης: παρόμοιες τριάδες κωδικοποιούν για το ίδιο αμινοξύ και επίσης για χημικά συγγενή αμινοξέα, μειώνοντας έτσι τη βλάβη από πιθανά λάθη κατά την ανάγνωση του μηνύματος RNA. Η καθολικότητα του γενετικού κώδικα, καθώς και η προέλευσή του, δηλαδή το πώς και σε ποιο στάδιο έγινε λειτουργία των νουκλεϊνικών οξέων η κωδικοποίηση της δομής των πρωτεϊνών, αποτελεί ακόμα αίνιγμα για τους μοριακούς εξελικτικούς βιολόγους. Όμως, η αρχαιότητά του, καταδεικνυόμενη από τη (σχεδόν απόλυτη) μοναδικότητά του, σε συνδυασμό με τη δομή ελαχιστοποίησης των λαθών, αποτελούν την εμφανέστερη απόδειξη ότι η εξέλιξη μέσω φυσικής επιλογής αποτελεί ένα από τα πλέον πρωταρχικά χαρακτηριστικά της ζωής.

Στην προσπάθεια εντοπισμού των πρώτων οντοτήτων με χαρακτηριστικά εμφίου έχουν διαγραφεί δύο κυρίως τάσεις μεταξύ των μελετητών της προέλευσης της ζωής. Καθεμιά από αυτές συνδέεται με ένα από τα χαρακτηριστικά των οργανισμών (όπως τους γνωρίζουμε σήμερα), που αποκαλούμε *μεταβολισμό* και *αναπαραγωγή*, με αντίστοιχους κύριους μοριακούς φορείς τις πρωτεΐνες και τα νουκλεϊνικά οξέα. Η απόπειρα του Oparin για την αναζήτηση της προέλευσης της ζωής σε πρωτο-κύτταρα που ήταν κυστίδια μέσα στον πρωταρχικό ωκεανό έχει να κάνει περισσότερο με το μεταβολισμό. Οι συγκεντρώσεις ουσιών στα κυστίδια ήταν μεγαλύτερες από ό,τι στο περιβάλλον, κάποιιο βιολογικοί καταλύτες ίσως εντοπιζόνταν σ' αυτά, και η ανάπτυξή τους σε μέγεθος θα μπορούσε μέσω φυσικοχημικών μηχανισμών (επιφανειακή τάση κ.ά.) να οδηγεί σε διχοτόμηση σε μικρότερα κυστίδια με σύσταση παρόμοια με του αρχικού, όμως η όλη διαδικασία δεν περιλαμβάνει αυτο-αντιγραφόμενα μόρια. Άλλωστε, την εποχή που ο Oparin ανέπτυξε τη θεωρία του δεν ήταν ακόμη γνωστός ο ρόλος του DNA ως μορίου φορέα της κληρονομικότητας.

Επόμενη τομή στην αναζήτηση της προέλευσης της ζωής αποτελεί η θεωρία του Manfred Eigen<sup>7</sup>, για την ανάπτυξη της οποίας χρησιμοποίησε *in vitro* πειράματα παρασκευής μορίων RNA και προσομοιώσεις σε υπολογιστή της εξέλιξης πληθυσμών μακρομορίων ικανών να αυτο-αντιγράφονται, αλλά με λάθη. Ο Eigen συμπέρανε ότι διάφοροι πληθυσμοί αυτών των μακρομορίων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (π.χ. καταλύοντας κάθε μοριακό είδος τον αναδιπλασιασμό ενός επομένου) συγκροτούν συστήματα τα οποία ονόμασε *υπερχύκλοι*. Οι υπέρχυκλοι αποτελούν μορφή αυτοοργάνωσης καταλυτικών μακρομορίων και εξελίσσονται με τρόπο ανάλογο της δαρβινικής εξέλιξης: ανταγωνιζόμενοι για την επικράτηση μέσω νομής πεπερασμένων περιβαλλοντικών πόρων (*προβιωτική εξέλιξη*) με άλλους υπέρχυκλους. Η άποψη του Eigen θεωρεί έτσι ως πρωταρχικά για την προέλευση της ζωής τα αυτο-αναπαραγόμενα μόρια («γυμνά γονίδια», όπως επίσης έχουν χαρακτηριστεί), συγγενή των σημερινών νουκλεϊνικών οξέων.

Η άποψη αυτή ενισχύθηκε από την ανακάλυψη μορίων RNA που μπορούν να δρουν ως βιολογικοί καταλύτες, ιδιότητα που έως πρόσφατα εθεωρείτο μονοπώλιο των πρωτεϊνών. Η εκδοχή της ζωής ως προερχόμενης από έναν προβιωτικό «κόσμο RNA» (RNA world<sup>8</sup>)

υποθέτει ότι το RNA έπαιξε αρχικά αμφότερους τους ρόλους του λειτουργικού-δομικού μορίου και του φορέα της κληρονομικότητας λόγω της ιδιότητάς του να αυτο-αντιγράφεται. Αργότερα, εξελισσόμενοι οι «πρωτο-οργανισμοί» απέδωσαν τις δύο αυτές λειτουργίες σε δύο διαφορετικούς τύπους μορίων, τη μεν δομή και λειτουργία στις καταλληλότερες γι' αυτό το σκοπό πρωτεΐνες (που όμως είναι παντελώς ανίκανες για αυτοπολλαπλασιασμό), τη δε διατήρηση και μεταβίβαση των γενετικών πληροφοριών στο σταθερό και χημικά αδρανές DNA, υποβοηθούμενο στην αντιγραφή του από κατάλληλα πρωτεϊνικά «εργαλεία». Η ύπαρξη θεμελιακών σταδίων κατά τη μεταβίβαση της πληροφορίας για τη σύνθεση των πρωτεϊνών, στα οποία εμπλέκεται το RNA (όπως στη δομή του «ριβοσώματος»), ενισχύει την υπόθεση ύπαρξης ενός πρωταρχικού «κόσμου RNA», καθώς τα στάδια αυτά θεωρούνται ως «μοριακά απολιθώματα». Τέτοια «μοριακά απολιθώματα», που παραμένουν αμετάβλητα λόγω της σημασίας τους για μακρότατα διαστήματα εξελικτικού χρόνου, είναι από καιρό γνωστά στη μοριακή εξέλιξη.

Η ευρύτατη αποδοχή της πρωταρχικότητας του RNA και κατά συνέπεια της πρωταρχικότητας των «μοριακών αντιγραφών» δεν έμεινε ωστόσο χωρίς αντίλογο. Αντιρρήσεις έχουν κυρίως διατυπωθεί από το γνωστό βιολόγο Stuart Kauffman και τον εξίσου σημαντικό φυσικό Freeman Dyson.

Ο Dyson συνεχίζει μία παράδοση ενασχόλησης με την προέλευση της ζωής φυσικών που ξεκινά τουλάχιστον από τον Erwin Schrödinger. Αυτός, σε ένα μικρό αλλά διάσημο βιβλίο του, το *What is Life*<sup>9</sup>, έθεσε πολλά από τα ερωτήματα στα οποία επανέρχονται οι μεταγενέστεροι μελετητές, ενώ προέβλεψε σημαντικές ιδιότητες του μοριακού φορέα της κληρονομικότητας (που σήμερα γνωρίζουμε ότι είναι το DNA). Ενώ όμως ο Schrödinger ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για την αντιγραφή ως ιδιότητα των βιολογικών συστημάτων, ο Dyson<sup>10</sup> κάνει μία συστηματική κριτική στις αδυναμίες της πρωταρχικότητας των μοριακών αντιγραφών. Παρατηρεί ότι στα πειράματα *in vitro* παρασκευής μορίων RNA (με ή χωρίς «καλούπι» RNA) χρησιμοποιήθηκε από τον Eigen πρωτεϊνικός καταλύτης κυτταρικής προέλευσης. Επίσης, σε ανάλογα πειράματα του Leslie Orgel, όπου απουσίαζε η πρωτεΐνη, η παρουσία «καλουπιού» RNA ήταν απαραίτητη για να υπάρξει αυτο-αντιγραφή. Επιπλέον, αναλύει τις αδυναμίες των πειραμάτων «μοριακής εξέλιξης» σε υπολογιστή πληθυσμών αυτοδιπλασιαζόμενων μορίων, καθώς έχει δείχθει ότι ένας «υπέρκυκλος» μπορεί εύκολα είτε να εκφυλιστεί λόγω «εγωιστικών» παραφάδων του είτε να διακοπεί από συμπτωματική έλλειψη πληθυσμού μορίων σε έναν «αδύνατο κρίκο» του.

Ο Dyson υποστηρίζει την αναγκαιότητα μιας διπλής προέλευσης της ζωής, όπου οι μοριακοί αντιγραφείς έρχονται δεύτεροι, ενώ προϋπάρχουν πληθυσμοί μορίων πρωτεϊνών με καταλυτική δράση.

Ο Stuart Kauffman θεωρεί ως πιθανό πρόδρομο της ζωής την ανάδυση οργάνωσης και τάξης από τη συλλογική συμπεριφορά περίπλοκων χημικών δικτύων αντιδράσεων που λειτουργούν μακράν της θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Μία αρχική παρατήρηση του Kauffman είναι η εξής<sup>11</sup>: Κανείς οργανισμός δεν μπορεί να έχει λιγότερες από περίπου 600 διαφορετικές πρωτεΐνες, όσες δηλαδή διαθέτουν οι αιλού-

στεροι μονοκύτταροι οργανισμοί, που είναι τα μυκοπλάσματα. Επιπλέον, τονίζει ο Kauffman, σ' αυτά, όπως και σε κάθε άλλο οργανισμό, δεν υπάρχουν, αυστηρά μιλώντας, μακρομορία αυτοπολλαπλασιαζόμενα «από μόνα τους», αλλά είναι το σύνολο του κυττάρου που αναπαράγει τον εαυτό του με ένα είδος σύνθετης αυτοκατάλυσης. Τα δύο αυτά γενικά χαρακτηριστικά της ζωής τον οδήγησαν στην παρακάτω θεωρία για την προέλευσή της.

Υποθέτει ως συνέπεια της δράσης της προβιωτικής χημείας τη δημιουργία μίας μεγάλης συλλογής μορίων πρωτεϊνικού τύπου, τα οποία εγκαθιστούν μέσα στην αρχική «προβιωτική σούπα» ένα δίκτυο αντιδράσεων. Καθένα μόριο μετατρέπεται σε ένα ή περισσότερα άλλα, με αντιδράσεις που περιλαμβάνουν είτε συνδέσεις άκρη-με-άκρη δύο μακρομορίων και συνεπώς δημιουργία μίας μακρότερης αλυσίδας αμινοξέων, είτε διασπάσεις μίας αλυσίδας με παραγωγή δύο άλλων βραχύτερων μακρομορίων. Πολλές από αυτές τις αντιδράσεις ενδέχεται να καταλύονται από κάποιο από την πληθώρα των παρόντων πρωτεϊνικών μορίων. Όπως δείχνεται από τον κλάδο της Φυσικής που είναι γνωστός ως «θεωρία αλλαγών φάσεως», όταν ένα τέτοιο δίκτυο αντιδράσεων γίνει αρκετά μεγάλο, αναπόδραστα θα αρχίσουν να κλείνουν κύκλοι αμοιβαία καταλυόμενων αντιδράσεων που πλέον λειτουργούν ως πρωτο-οργανισμοί ικανοί για περαιτέρω εξέλιξη μέσω ανταγωνισμού. Εγκλείσματα (του τύπου των κυστιδίων του *Oragin*) που περιλαμβάνουν τέτοια αυτοοργανούμενα δίκτυα αντιδράσεων, διαιρούμενα μέσω φυσικοχημικών διαδικασιών, οδηγούν σε απογόνους που, ενώ δεν είναι «κλώνοι» του αρχικού «κυττάρου» (όπως συμβαίνει στα σημερινά κύτταρα που διαθέτουν αυτο-αντιγραφόμενο γενετικό υλικό), συνεχίζουν να χαρακτηρίζονται από τις μεταβολικές ικανότητες των αρχικών κυστιδίων.

Ενδεχομένως, η εξέλιξη κάποιων τέτοιων μεταβολικά ενεργών πρωτο-κυττάρων να έδωσε τη δυνατότητα σύνθεσης και σταθεροποίησης των πρώτων νουκλεϊνικών μακρομορίων, λόγω του πλούτου καταλυτικά ικανών πρωτεϊνών που διέθεταν. Αφού το RNA άρχισε έτσι να παρασιτεί στα πρωτο-κύτταρα αυτά, ένας ακόμη αυτοκαταλυτικός κύκλος έκλεισε όταν σε κάποιους από τους απογόνους τους αναπτύχθηκε ένας στοιχειώδης γενετικός κώδικας ικανός να παράγει, για πρώτη φορά πλέον βάσει νουκλεϊνικού «καλουπιού», τις πρωτεΐνες που εξασφάλιζαν τον αναδιπλασιασμό των νουκλεϊνικών οξέων (ξαναβρίσκουμε εδώ τη «διπλή προέλευση της ζωής» κατά Dyson).

Κλείνοντας, μπορούμε να πούμε ότι η ακριβής ιστορία της προέλευσης της ζωής περιλαμβάνει πολλά αδιευκρίνιστα σημεία και μερικά από αυτά ίσως να μη γίνουν ποτέ γνωστά. Εντούτοις, σημαντικές ενδείξεις συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι ήταν το προϊόν μίας μακράς εξελικτικής προβιωτικής πορείας. Για την κατανόησή της είναι απαραίτητη η συμμετοχή πολλών ταχύτατα αναπτυσσόμενων επιστημονικών κλάδων: της θερμοδυναμικής μακράν της ισορροπίας, της θεωρίας των περίπλοκων συστημάτων, της χαοτικής δυναμικής και της θεωρίας των αλλαγών φάσεως.

Ακόμη και εάν, όπως γίνεται ολοένα και περισσότερο φανερό, η αρχική περίοδος ανάπτυξης της ζωής ήταν μεταβολικής-πρωτεϊνικής και όχι αυτοαντιγραφικής-νουκλεϊνικής φύσεως, για την εμφάνιση των σύνθετων μορφών ζωής η ύπαρξη του γενετικού μηνύματος πρέπει να ήταν απολύτως αναγκαία. Η εγκατάσταση της διχοτομίας μεταξύ ενός σημαίνοντος πληροφορικού μορίου (DNA) και ενός σημαινόμενου δομικού-λειτουργικού μορίου

(πρωτεϊνών) ήταν απαραίτητη για τη δράση της φυσικής επιλογής και των όποιων άλλων μηχανισμών έχουν συντελέσει στον παρόντα πλούτο των μορφών ζωής<sup>12</sup>. Είναι μάλλον απίθανο κάποιος άλλος τρόπος μετάδοσης της κληρονομικής πληροφορίας, που δεν θα διέθετε την ψηφιακή δομή του γενετικού μηνύματος, να ήταν συμβατός με την ύπαρξη π.χ. των πολυκύτταρων οργανισμών.

Ίσως τελικά ένα ενδιαφέρον ερώτημα να ήταν: εάν ποτέ συναντήσουμε κάποια μορφή οργανισμών εξωγήινης προέλευσης (αποκλείοντας τις θεωρίες «πανσπερμίας»<sup>13</sup>), κατά πόσον και αυτοί θα διέθεταν «πίσω» από το φαινότυπό τους ένα επίπεδο ψηφιακά καταγεγραμμένου γενετικού μηνύματος. Ίσως θα άξιζε να στοιχηματίσουμε πως να.

### Σημειώσεις

1. Jacques Monod, *Η Τύχη και η Αναγκαιότητα*, εκδ. Ράππα.
2. Τα τελευταία χρόνια έχει κυκλοφορήσει πληθώρα ποιτικών βιβλίων εκλαΐκευσης και προβληματισμού στο πεδίο της «εξελικτικής», π.χ. *Η Θεωρία της Εξέλιξης* του J. Maynard-Smith (εκδ. Αιόλος), *Το Εγωστικό Γονίδιο και Ο Τυφλός Ωρολόγοποιός* του Richard Dawkins (εκδ. Κάτοπτρο). Επίσης οι συλλογές δοκιμίων του Κώστα Κομψιά: *Τα Δαρβινικά* (εκδ. Ερμής) και *Εκτείνοντας τον Δαρβινισμό* (εκδ. Νεφέλη), καθώς και η συμμετοχή του στο παρόν τεύχος της *Ουτοπίας*.
3. Gregoire Nicolis & Ilya Prigogine, *Exploring Complexity*, W.H. Freeman & Co. Επίσης, έχουν κυκλοφορήσει στα ελληνικά σημαντικά βιβλία με θέμα τα πολύπλοκα και μη γραμμικά συστήματα και τη θεωρία του χάους, όπως τα: *Τύχη και Χάος* του D. Ruelle (εκδ. Κωσταράκη), *Το Βέλος του Χρόνου* του R. Highfield και *Χάος, μία νέα επιστήμη* του J. Gleick (εκδ. Κάτοπτρο).
4. Ilya Prigogine & Isabelle Stengers, *Τάξη μέσα από το Χάος* (εκδ. Κέδρος).
5. Α.Ι. Oparin, *Η Προέλευση της Ζωής* (εκδ. Σύγχρονο Βιβλίο).
6. R.E. Dickerson, "Chemical Evolution and the Origin of Life" (βρίσκεται στο *Evolution. A Scientific American Book*, 1978). Επίσης, S.L. Miller, J.W. Schopf, A. Lazcano, "Oparin's 'Origin of life': Sixty Years Later", *Journal of Chemical Evolution*, 44, 351. Τα παραπάνω άρθρα αποτελούν μία σύντομη και περιεκτική παρουσίαση των κυριότερων προβλημάτων που ανακύπτουν γύρω από την προβωτική Χημεία. Βλ., επίσης, παρακάτω, τις σημειώσεις 10 και 11.
7. M. Eigen and P. Shuster, *The hypercycle. A Scientific American Book*.
8. D.C. Jeffares, A.M. Poole, D. Penny, "The Pathe from the RNA world", "Relics from the RNA world", *Journal of Chemical Evolution*, 46, 1-17 & 18-36.
9. E. Schrödinger, *What is Life & Mind and Matter*, Cambridge U.P.
10. F. Dyson, *Προελεύσεις της Ζωής* (εκδ. Τροχαλία).
11. S. Kauffman, "What is life?: was Schrödinger right?" στο *What is Life? The Next Fifty Years* (Eds. M.P. Murphy and L.A. O'Neill), Cambridge U.P.
12. Γιάννης Αλμυράντης, «Το γενετικό μήνυμα ως κείμενο», *Ουτοπία*, 2000. Εισαγωγική σύνοψη των χαρακτηριστικών του γονιδιώματος ως ψηφιακής καταγραφής της κληρονομικότητας με ιδιότητες «κειμένου».
13. Θεωρίες που υποθέτουν ότι η ζωή στη γη έχει εξωγήινη προέλευση. Αυτή η υπόθεση πρωτοδιατυπώθηκε από τον Aegleus και με κάπως διαφορετική μορφή υποστηρίζεται σήμερα από τον φυσικό Fred Hoyle.

