

Από τον Ανόργανο Κόσμο στους πρώτους (ζώντες) Οργανισμούς

Ομιλητής: **Κ.Ε. ΣΕΚΕΡΗΣ**

*Καθηγητής Βιολογικής Χημείας στο Πανεπιστήμιο Αθηνών
και Διευθυντής του Ινστιτούτου Βιολογικών Ερευνών και Βιοτεχνολογίας του Ε.Ι.Ε.*

Περίληψη

Η Αρχή της δημιουργίας του Σύμπαντος τοποθετείται προ 10-18 δισεκατομμυρίων ετών, με το Big Bang, την εκρηκτική διαστολή του σημειακά συμπυκνωμένου συνόλου μάζας/ενεργείας. Διαδοχικά σχηματίστηκαν τα στοιχειώδη σωματίδια, οι πυρήνες των ατόμων, τα άτομα, αέρια νέφη, κοσμική σκόνη, άστρα και γαλαξίες. Προ 4,5 δισεκατομμυρίων ετών δημιουργήθηκε το πλιακό μας σύστημα και η γη. Από ανόργανα συστατικά συντέθηκαν στις ακραίες επικρατούσες καταστάσεις οι οργανικές ουσίες – πρόδρομα των μορίων που χαρακτηρίζουν τη ζωντανή ύλη (αβιογενής φάση παραγωγή βιομορίων), που εν συνεχεία συνενώθηκαν για το σχηματισμό των πιο πολύπλοκων βιομορίων – RNA, DNA, πρωτεϊνών, λιπών, κ.ά.

Τα βιομόρια οργανώθηκαν προ 3,5 δισεκατομμυρίων ετών σε πρωτόγονες κυτταρικές δομές, προϋπόθεση για την εκδήλωση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων της ζωντανής ύλης. Πρώτος φορέας γενετικών πληροφοριών με ικανότητα όμοιου αναδιπλασιασμού φαίνεται να ήταν το RNA, αργότερα το ρόλο αυτό ανέλαβε το DNA. Από τα πρωτόγονα ετερότροφα βακτηρίδια εξελίχθηκαν προ 3 δισεκατομμυρίων ετών αναερόβια φωτοσυνθετικά βακτηρίδια και βακτηρίδια που δέσμευαν άζωτο, ακολούθησαν προ 2,5 δισ. ετών τα αερόβια φωτοσυνθετικά βακτηρίδια, που επηρέασαν τη σύσταση της ατμόσφαιρας (εμπλουτισμός σε οξυγόνο/όζον). Από τα προκαρυωτικά βακτηρίδια, με τη δημιουργία κυτταρικού πυρήνα, σχηματίστηκαν προ 1,5 δισ. ετών τα αερόβια ευκαρυωτικά κύτταρα που με ενσωμάτωση σε αυτά μικροοργανισμών, προδρόμων των μιτοχονδρίων και χλωροπλαστών, και αναδιπλασιαζόμενα με μίτωση, πήραν τον εξελικτικό δρόμο προς τα φυτά και ζώα του σημερινού κόσμου.

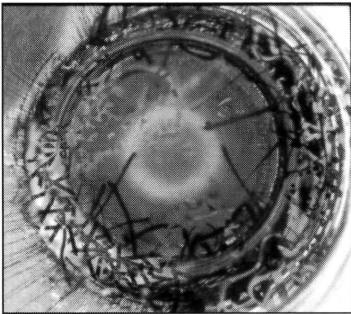
1. Εισαγωγή

Από τα πιο αγωνιώδη ερωτήματα με τα οποία έρχεται αντιμέτωπος ο άνθρωπος, μόλις συνειδητοποιήσει τη μοναδικότητά του και αποκτήσει την έννοια του εγώ, είναι η προέλευση του, πώς βρέθηκε πάνω στη γη, ποιά η σχέση του με το σύμπαν και πώς δημιουργήθηκε αυτό. Τα ερωτήματα αυτά τον παιδεύουν σε κάθε φάση της ζωής του, όμως φεύγει από τον κόσμο αυτό χωρίς να λάβει πειστικές και εύλογες απαντήσεις. Για το μεγαλύτερο διάστημα της ιστορίας του ανθρώπου τα ερωτήματα αυτά αποτέλεσαν πεδίο θεολογικών-φιλοσοφικών δοξασιών, μακριά από την αυστηρή θεώρηση των πειραματικών επισημάτων. Η πίστη σε έναν Πλάστη που δημιούργησε τον κόσμο και έπλασε τον άνθρωπο κατ' εικόνα και καθ' ομοίωση λύνει με απλό τρόπο τις υπαρξιακές αγωνίες.

Η εκπληκτική πρόοδος των θετικών επιστημών – φυσικής, χημείας, βιολογίας – του τελευταίου αιώνα, άνοιξε το δρόμο για τη θεώρηση της κοσμογονίας και της γενέσεως της ζωής από την “επιστημονική” σκοπιά. Πολλά σχετικά ερωτήματα αρχίζουν και βρίσκουν λύσεις. Όμως η αδυναμία να συλλάβουμε την έννοια του “τίποτε” – την κατάσταση πριν από το ξεκίνημα της γενέσεως – διατηρεί ζωντανή και επίκαιρη την έννοια του Θεού, ως Δυνάμεως, που χρησιμοποίησε συγκεκριμένη “μεθοδολογία” για την κοσμογονία, περιγραφόμενης περιφραστικά στην “Γενεση”. Τη “Μεθοδολογία” αυτή η θετικός επιστήμονας της σήμερον προσπαθεί να αναλύσει στις λεπτομέρειες της, είτε πιστεύει, είτε όχι, στην ύπαρξη της “Αρχικής Κινητήριας Δύναμης”.

2. Εν αρχή ην ο λόγος - Κοσμογονία

Εφόσον παραμένει σε ισχύ η θεμελιώδης εξίσωση του Einstein, $E=mc^2$, δηλ. ούτε μάζα ούτε ενέργεια μπορούν να δημιουργηθούν από το τίποτε, είναι αδύνατον να φαντασθούμε την αρχική, την προ της Κοσμογονίας, κατάσταση. Μαθηματικές λύσεις των θεωρητικών φυσικών σ’ αυτό το πρόβλημα, εκτός του ότι είναι απόλυτα ακατανόητες από τους μη ειδικούς, δεν ικανοποιούν και μόνο ως επιτεύγματα της ανθρώπινης διανόησης θαυμάζονται. Η Κοσμογονία, όπως τη φαντάζονται σήμερα οι ειδικοί, με βάση θεωρητικές και πειραματικές μελέτες και μαρτυρίες, αρχίζει κάπου μεταξύ 10-18, πιθανώς 15, δισεκατομμυρίων ετών, όταν το σύνολο της ενέργειας και μάζας του σημερινού Κόσμου ήταν συμπυκνωμένο σε ένα “μαθηματικό σημείο”. Το σημείο αυτό απότομα, εκρηκτικά, άρχισε να διαστέλεται (επομένως και να ψύχεται) με καταπληκτική ταχύτητα, διεργασία που συνεχίζεται και σήμερα. Είναι αυτό που αποκαλείται “Big Bang” (Εικ. 1). Σε δισεκατομμύρια του δευτερολέπτου η θερμοκρασία του Κόσμου “έπεσε” στα 100 εκατομμύρια φορές της θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του ηλίου. Τότε εμφανίσθηκαν τα στοιχειώδη σωματίδια, quarks (και πλεκτρόνια), καθώς και τα αντισωμάτια, (αντιquarks και αντιπλεκτρόνια), τα οποία έπλεαν ελεύθερα στην ενεργειακή “θάλασσα” και που συνεχώς παρήγοντο, αλλά και καταστρέφοντο, λόγω των τεραστίων θερμοκρασιών.



Εικόνα 1

Το “Big Bang” όπως το φαντάζεται ο Τάκης Κατσουλίδης

Με τη συνεχιζόμενη ψύξη επιβραδύνθηκε τόσο ο σχηματισμός όσο και η καταστροφή των σωματιδίων, περισσότερο όμως ο σχηματισμός τους. Αν δεν υπήρχε μια ελάχιστη υπεροχή quarks και πλεκτρονίων έναντι των αντιquarks και αντιπλεκτρονίων (δηλ. ύλης έναντι αντιύλης) δεν θα ήταν δυνατή η δημιουργία του Κόσμου.

Όταν το σύμπαν διαστελλόμενο και ψυχόμενο έφθασε το μέγεθος περίπου του ηλιακού μας συστήματος, σχηματίσθηκαν από τα quarks νετρόνια και πρωτόνια, τα οποία, κατά τη συνεχιζόμενη διαστολή, έδωσαν ατομικούς πυρήνες, κυρίως ηλίου και δευτερίου (το σύνολο σχεδόν του ηλίου και δευτερίου που υπάρχει σήμερα σχηματίσθηκε την περίοδο εκείνη). Η σύγκρουση δύο πυρήνων ηλίου οδήγησε σε μια φευγαλέα μορφή βηρυλλίου, η οποία συγκρουόμενη με ένα ακόμη πυρήνα ηλίου, έδωσε άνθρακα. Συνένωση πυρήνα άνθρακα

με άλλον έναν πυρήνα πλίου έδωσε οξυγόνο. Με παρόμοιους μηχανισμούς δημιουργήθηκαν οι πυρήνες των γνωστών σήμερα στοιχείων. Όλα αυτά συνέβησαν στο πρώτο λεπτό της Δημιουργίας.

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ήταν αδύνατη η συνένωση των πυρήνων με τα ηλεκτρόνια. Τα ουδέτερα άτομα εμφανίσθηκαν στα επόμενα 300.000 χρόνια, όταν το σύμπαν έφθασε σε μέγεθος χίλιες φορές μικρότερο από το σημερινό. Τα ουδέτερα άτομα συνενώθηκαν βαθμιαίως σε αέρια νέφη, κοσμική σκόνη, που εξελίχθηκε σε άστρα και, όταν το σύμπαν έφθασε το ένα πέμπτο περίπου του σημερινού μεγέθους, σε γαλαξίες. Ένα από τα δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων ηλιακών συστημάτων που δημιουργήθηκαν είναι και το δικό μας. Υπολογίζεται πως το ηλιακό μας σύστημα σχηματίστηκε προ 4,5-5 περίπου δισεκατομμυρίων ετών, όταν ο Κόσμος είχε τα 2/3 του σημερινού μεγέθους του. Η γη μας, υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και βρισκόμενη υπό συνεχή βομβαρδισμό μικροτέρων ή μεγαλύτερων σωμάτων, ανέπτυξε στο εσωτερικό της τεράστιες θερμοκρασίες, που προκαλούσαν υφαιστειακές εκρήξεις και ροή λάβας. Οι υψηλές θερμοκρασίες στην επιφάνεια της γης καθιστούσαν αδύνατη την ύπαρξη ζωής. Η έξοδος αερίων από το εσωτερικό που συνόδευε τις εκρήξεις δημιούργησε στα πρώτα εκατομμύρια χρόνια τα 80-85% της γήινης ατμόσφαιρας, που συμπληρώθηκε βαθμιαίως κατά τα επόμενα 4 δισεκατομμύρια χρόνια. Κατά πάσα πιθανότητα η πρωτόγονη ατμόσφαιρα αποτελείτο κυρίως από CO₂, N₂, υδρατμούς, με ίχνη μεθανίου, αμμωνίας, διοξειδίου του θείου και υδροχλωρικού οξέος, στερείτο όμως οξυγόνου.

Η απελευθέρωση τεραστίων όγκων νερού από το φλοιό της γης δημιούργησε τους ωκεανούς και τον κύκλο του νερού. Τα οξέα της ατμόσφαιρας διέβρωναν τα πετρώματα εμπλουτίζοντάς τα με ανθρακικά άλατα.

Στην ατμόσφαιρα άρχισε, κατά τις πρώτες εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια, να ελαττώνεται το διοξείδιο του άνθρακα, λόγω δραστηριότητας των μικροοργανισμών σύμφωνα με τους θιασώτες της θεωρίας της “Γαίας”, κατ’ άλλους λόγω γεωχημικών διεργασιών. Η ελάττωση του CO₂ είχε μεγάλη σημασία για την εμφάνιση των σημερινών μορφών ζωής, που βασίζονται στην ύπαρξη ατμόσφαιρας οξυγόνου, τόσο για την αναπνοή τους, όσο και για την προφύλαξη από την υπερϊώδη ακτινοβολία (σχηματισμός όζοντος).

3. Τα χαρακτηριστικά της ζωντανής ύλης

Η πιο μικρή μονάδα, που δείχνει τις ιδιότητες της ζωντανής ύλης, είναι το κύτταρο. Το κύτταρο μπορεί αυτό καθαυτό να αποτελεί αυτοδύναμο οργανισμό (μονοκύτταροι ή ακύτταροι οργανισμοί) ή να οργανώνεται σε μεγαλύτερες πολυκυτταρικές οντότητες (πολυκύτταροι οργανισμοί), όπως ο άνθρωπος. Το κύτταρο από τη χημική άποψη χαρακτηρίζεται από ορισμένα βιομόρια (νουκλεϊνικά οξέα –DNA και RNA–, πρωτεΐνες, λιπίδια, και πολλά άλλα συστατικά), με συγκεκριμένες λειτουργίες, διατεταγμένα κατά τρόπο ώστε να προσδίδουν στο κύτταρο τις χαρακτηριστικές για τη ζωή ιδιότητες, όπως την ικανότητα μεταδόσεως των γενετικών πληροφοριών, της αναπαραγωγής και του μεταβολισμού (δηλ. παραγωγής ενέργειας από τη διάσπαση βιομορίων και τη χρησιμοποίηση της ενέργειας για τη σύνθεση των βιομορίων από απλούστερους δομικούς λίθους), την αντίδραση στο περιβάλλον και την κίνηση.

ση. Τα βιομόρια αυτά, έξω από την κυτταρική δομή, μπορεί να δείχνουν μερικές από τις ιδιότητες του ζωντανού οργανισμού, όχι όμως το σύνολο των χαρακτηριστικών του. Υπάρχουν και οριακές μορφές ζωντανής ύλης, όπως οι ιοί, που για να εκδηλώσουν πλήρως τις ιδιότητες των ζωντανών οργανισμών, πρέπει πρώτα να προσβάλλουν διάφορα κύτταρα και να χρησιμοποιήσουν τους μηχανισμούς των κυττάρων αυτών για ίδιο όφελος.

4. Από την ανόργανη ύλη στα πρώτα απλά βιομόρια

Όπως προαναφέρθηκε, η ζωντανή ύλη, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για μικρόβια, φυτά ή ζώα, χαρακτηρίζεται από την παρουσία όμοιων συγκεκριμένων οργανικών χημικών ουσιών, των λεγόμενων βιομορίων. Από τα σημαντικότερα βιομόρια είναι τα νουκλεϊνικά οξέα – DNA, ο φορέας των γενετικών πληροφοριών, και RNA, σημαντικό για την έκφραση των γενετικών πληροφοριών – οι πρωτεΐνες με τις οποίες επιτελούνται όλες οι κυτταρικές λειτουργίες, τα λιπίδια, σημαντικά για το σχηματισμό των βιολογικών μεμβρανών, και άλλα πολλά. Τα βιομόρια αυτά είναι σύνθετες ουσίες, που αποτελούνται από απλούστερους δομικούς λίθους, όπως, όσον αφορά τα νουκλεϊκά οξέα, από νουκλεοτίδια (που κι αυτά αποτελούνται από πιο απλά μόρια, [αζωτούχες βάσεις, ριβόζη ή δεσοξυριβόζη και φωσφορικό οξύ]), αμινοξέα, (όσον αφορά τις πρωτεΐνες) και λιπαρά οξέα και γλυκερίνη, (όσον αφορά τα λίπη). Μια πληθώρα απλών οργανικών μορίων απαντάται επίσης, ως ενδιάμεσα των μεταβολικών αντιδράσεων, όπως οργανικά οξέα, αλδεΐδες, κετόνες και εστέρες.

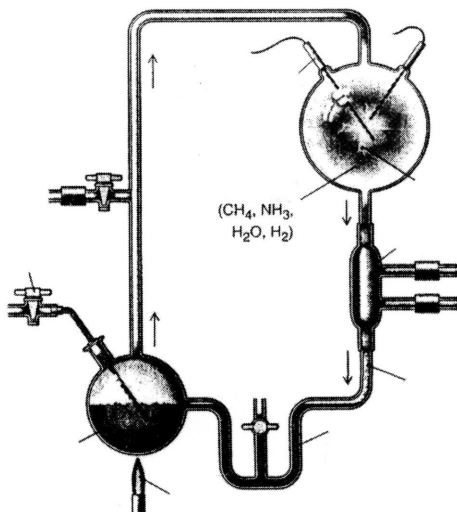
Όταν δημιουργήθηκε η γη μας προ 4.5 δισεκατομμυρίων ετών, ήταν ένας πλανήτης χωρίς ίχνος ζωής, λόγω των ακραίων συνθηκών που επικρατούσαν. Μετά από ένα δισεκατομμύριο χρόνια, όμως, εμφανίστηκαν οι πρώτοι ζωντανοί οργανισμοί. Όλα τα ευρήματα δείχνουν ότι από αυτούς τους πρώτους οργανισμούς, με βάση τη θεωρία της εξελίξεως του Darwin (και του Wallace), που θα αναπτυχθεί στην επόμενη ενότητα, εξελίχθηκαν όλες οι γνωστές μορφές ζώντων οργανισμών. Το ερώτημα που έπρεπε να απαντηθεί επομένως ήταν, πώς δημιουργήθηκαν οι πρώτοι αυτοί οργανισμοί. Τα πειράματα του Louis Pasteur έδειξαν, σε αντίθεση με δοξασίες που επικρατούσαν μέχρι τότε, ότι αυτόματη γένεση δεν ήταν δυνατή. Επομένως μέσα στο πρώτο δισεκατομμύριο χρόνια θα έπρεπε να έχουν συντεθεί όλα τα απαραίτητα για την ύπαρξη της ζωής βιομόρια και να έχουν “συναρμολογηθεί” στους πρώτους οργανισμούς, ικανούς να επιζήσουν στις τότε συνθήκες.

Ήταν όμως δυνατή η σύνθεση βιομορίων στις συνθήκες που επικρατούσαν τότε; Απάντηση σ’ αυτό το ερώτημα έδωσαν τα πειράματα του νεαρού τότε χημικού Stanley Miller, συνεργάτου του καθηγητή και κατόχου βραβείου Nobel, Harold Urey. Όπως δείχνεται στην Εικόνα 2, ο Miller εξέθεσε μίγμα αερίων, αποτελούμενο από μεθάνιο, αμμωνία, υδρογόνο και υδρατμούς, σε ηλεκτρικές εκκενώσεις και απέδειξε ότι υπό τέτοιες συνθήκες χημικές και φυσικές, που προσομοίαζαν, κατ’ αυτόν, στην αρχέγονη ατμόσφαιρα, ήταν δυνατή η παραγωγή προδρόμων χημικών ουσιών (αμινοξέων) που αποτελούν τα δομικά συστατικά των πρωτεϊνών του κυττάρου. Ενδιαφέρον είναι ότι ένας μετεωρίτης που έπεσε αργότερα στη γη περιείχε τα αυτά αμινοξέα σε παρόμοια αναλογία, όπως αυτά που συντέθηκαν στο πείραμα του Miller (Πίνακας Ι). Παρόλο που οι συνθήκες του πειράματος του Miller δεν θεωρούνται σήμερα ότι αντανακλούν την ακριβή σύνθεση της τότε ατμόσφαιρας, τα πειράματα αυτά απετέλεσαν την απαρχή

Εικόνα 2

Πείραμα του S. Miller

Στην υάλινη σφαίρα (κάτω αριστερά) τοποθετήθηκε νερό, η πάνω σφαίρα περιείχε μεθάνιο, αμμωνία και υδρογόνο καθώς και ατμούς νερού. Συνεχείς ηλεκτρικές εκκενώσεις στα αέρια οδήγησε στο σχηματισμό οργανικών ουσιών που δείχνονται στον Πίνακα 1. Τα ενδιάμεσα βήματα περιλαμβάνουν υδροκυάνιο + αλδεΐδη = αμινονιτρίλιο, το οποίο με H_2O δίνει αμινοξέα. Σε άλλα ανάλογα πειράματα (ανάμιξη υδροκυανίου και αμμωνίας σε υδατικό διάλυμα) σε αναγωγική ατμόσφαιρα παρήχθησαν, εκτός από αμινοξέα, και αδενίνη, παρουσία δε C_2N_2 (κυανογόνου) και HC_3N (κυανοακετυλένιου) και οι υπόλοιπες βάσεις των νουκλεϊνικών οξέων.



Πίνακας 1

Σύγκριση αμινοξέων που παράγονται στο πείραμα Miller με αυτά που ανιχνεύθηκαν στο μετεωρίτη που έπεσε στην Αυστραλία — στη θέση Murchison.

Αμινοξέα	Μετεωρίτης	Πείραμα Miller
γλυκίνη	++++	++++
αλανίνη	++++	++++
α-αμινο-N-βουτυρικό οξύ	++	+++
α-αμινοισοβουτυρικό οξύ	++	++++
βαλίνη	++	+++
νορβαλίνη	+++	+++
ισοβαλίνη	++	++
προλίνη	+	+++
ασπαραγινικό οξύ	+++	+++
γλουταμινικό οξύ	++	+++
β-αλανίνη	++	++
β-αμινο-N-βουτυρικό οξύ	+	+
γ-αμινοβουτυρικό οξύ	++	+
σαρκοσίνη	+++	++

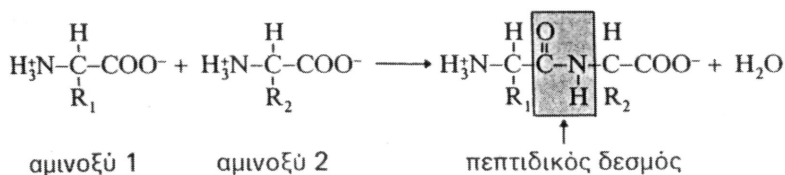
πολυάριθμων αναλόγων πειραμάτων, υπό διαφορετικές φυσικές και χημικές συνθήκες, που κατέληξαν σε παρόμοια αποτελέσματα, δηλ. τη σύνθεση πολλών αμινοξέων, αλλά και άλλων προδρόμων βιομορίων, όπως αζωτούχων βάσεων, σακχάρων, κ.ά.

Σε ένα από τα πειράματα αυτά αποδείχθηκε η σχετικά εύκολη παραγωγή επτά αμινοξέων. Είναι ενδιαφέρον ότι τα αμινοξέα αυτά είναι αυτά που βρίσκονται σε αφθονία στη γη. Τα αμινοξέα είναι ασύμμετρα μόρια, παρουσιάζόμενα στην L- και D- μορφή. Στη ζωντανή ύλη, όμως, παρουσιάζεται σχεδόν αποκλειστικά η L-μορφή των αμινοξέων. Το πώς προήλθε αυτό συζητείται ακόμη. Μια θεωρία είναι ότι η μεγαλύτερη αστάθεια των D-αμινοξέων οδήγησε στην πιο εύκολη καταστροφή τους και σε εμπλουτισμό της L-μορφής. Εκτός των βιομορίων που σήμερα αναγνωρίζονται ως συστατικά της ζωντανής ύλης, σχηματίστηκαν υπό αρχέγονες συνθήκες – όπως φαίνεται από τα πειράματα τύπου Miller – και μόρια που δεν απαντώνται στους σημερινούς οργανισμούς. Τα μόρια αυτά, επομένως, “αποκλείστηκαν”, για άγνωστους λόγους, στο να συμμετάσχουν στη δόμηση του κυττάρου.

5. Από τα πρώτα απλά στα σύνθετα βιομόρια

Από τα πειράματα τύπου Miller έγινε φανερό ότι τα περισσότερα πρόδρομα μόρια των πολυπλοκότερων βιομορίων ήταν δυνατό να συντεθούν στις συνθήκες που επικρατούσαν στην αρχέγονη γη. Το ερώτημα που τίθεται είναι το πώς αυτά τα πρόδρομα μόρια ενώθηκαν για σχηματισμό των πιο σύνθετων βιομορίων, όπως είναι οι πρωτεΐνες και τα νουκλεϊνικά οξέα.

Καταρχήν θα έπρεπε τα πρόδρομα να βρίσκονται σε συγκεντρώσεις αρκετά μεγάλες, ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω συνένωσή τους (δημιουργία “αρχέγονης σούπας”). Πιθανώς διάφορες γεωφυσικές διεργασίες, όπως εξάτμιση νερού, καθίζηση, κρυστάλλωση, κ.ά., οδήγησαν σε διάφορα μικρο- ή μακρο-περιβάλλοντα, που αφενός εξασφάλιζαν τις απαιτούμενες συγκεντρώσεις, αφετέρου και θερμοκρασίες συμβατές με τη ζωή. Στις υψηλές θερμοκρασίες της αρχέγονης γης, που ήταν απαραίτητες για τη σύνθεση των απλών ενώσεων, θα έπρεπε τα σύνθετα μόρια να καταστρέφονταν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των πρόδρομων των πρωτεϊνών, των αμινοξέων, φαίνεται ότι η προσρόφησή τους στην επιφάνεια φυσικών ορυκτών (πηλών) σε πιο ήπιες συνθήκες, επέτρεψε τη δημιουργία του πεπτιδικού δεσμού (Εικ. 3), επομένως τη συνένωσή τους σε πολυπεπτιδικές αλυσίδες.

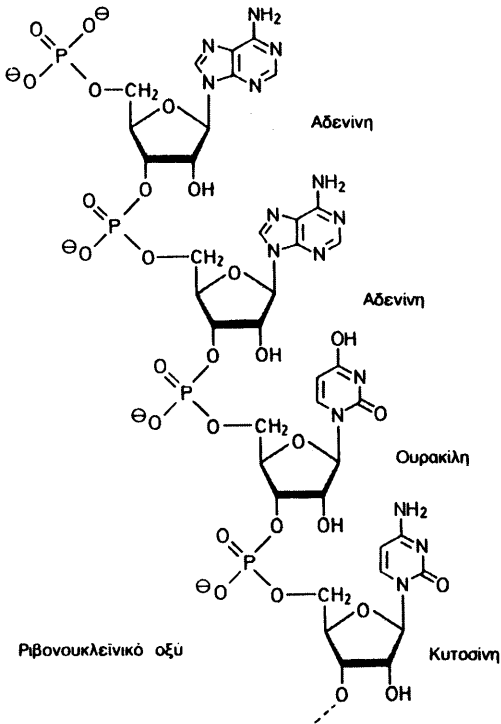


Εικόνα 3

Ο σχηματισμός πεπτιδικού δεσμού από τη συνένωση δύο αμινοξέων.

Η καρβοξυλική ομάδα του ενός αμινοξέος ενώνεται με την αμινομάδα του επόμενου, με αφαίρεση ύδατος.

Βασικά συστατικά των νουκλεϊνικών οξέων είναι τα νουκλεοτίδια, που κι αυτά αποτελούνται από πιο απλά μόρια, τις αζωτούχες βάσεις, σάκχαρα (ριβόζη στο RNA, δεσοζυριβόζη στο DNA) και φωσφορικό οξύ (Εικ. 4). Οι αζωτούχες βάσεις έχουν συντεθεί in vitro σε πειράματα τύπου Miller, τα σάκχαρα υπό συνθήκες που προσομοιάζουν τη ροή ύδατος θερμών πηγών πάνω σε στρώμα πηλού που φέρει φωσφορικό οξύ (το φωσφορικό οξύ εμφανίστηκε ως αποτέλεσμα ηφαιστειακής δραστηριότη-



Εικόνα 4

Δομή νουκλεϊνικών οξέων

Δείχνεται η δομή του RNA (όμοια είναι η δομή του DNA, με εξαίρεση ότι περιέχει δεσοξυριβόζη αντί της ριβόζης, και θυμίνη στη θέση της ουρακίλης). Το RNA αποτελείται από νουκλεοτιδία, καθένα από τα οποία αποτελείται από μια φωσφορική ομάδα συνδεδεμένη με μια αζωτούχο βάση (γουανίνη, αδενίνη, ουρακίλη και κυτοσίνη).

Το μονόκλωνο RNA μπορεί να σχηματίζει και δίκλωνο RNA, με τη δημιουργία δεσμών βάσεων μεταξύ ουρακίλης του ενός κλώνου με την αδενίνη του άλλου (και της κυτοσίνης με τη γουανίνη). Ο σχηματισμός των ζευγών βάσεων και η καταλυτική ιδιότητα του RNA ήταν ουσιαστικές ιδιότητες για τη δυνατότητα του RNA να αναδιπλασιάζεται.

τας). Όπως και κατά το σχηματισμό του πεπτιδικού δεσμού, έτσι και κατά τη σύνδεση των απλούστερων προδρόμων προς σχηματισμό νουκλεοτιδίων (και, ακολούθως νουκλεϊνικών οξέων) αφαιρείται νερό. Στην περίπτωση αυτή καταλυτικό ρόλο παίζει το φωσφορικό οξύ. Πάντως σε πειράματα τύπου Miller δεν έχουν παραχθεί νουκλεοτιδία, προφανώς λόγω της αστάθειάς τους στις συνθήκες του πειράματος. Όπως και στην περίπτωση των πρωτεϊνών, στη σύνθεση των νουκλεϊνικών οξέων σημαντικό ρόλο θα έπαιζαν οι επιφάνειες των πηλών και τα μεταλλικά ιόντα που περιείχαν. Η γραμμική δομή των πηλών φαίνεται ότι προκάλεσε τη γραμμική διάταξη των νουκλεοτιδίων, που συνενώθηκαν με αφαίρεση νερού, και σχημάτισαν μικρότερα ή μεγαλύτερα πολυμερή (νουκλεϊνικά οξέα). Την απαιτούμενη ενέργεια για τις συνθετικές διεργασίες προσέφεραν τα προσροφημένα στους πηλούς πολυφωσφορικά.

6. Από τα βιομόρια στα πρώτα αρχέγονα κύτταρα

Ενώ η σύνθεση των βιομορίων που αποτελούν τα συστατικά του κυττάρου μπορεί και πειραματικά να αναπαραχθεί στις υποθετικές αβιοτικές συνθήκες, η “συναρμολόγηση” των βιομορίων προς μια αρχέγονη μορφή κυττάρου, με ικανότητες που χαρακτηρίζουν τα ζωντανά κύτταρα, δηλ. αντιγραφή/αναδιπλασιασμό/μεταβίβαση των γενετικών πληροφοριών και μεταβολισμό, παριστάνει ένα πολύ πιο δύσκολο πρόβλημα. Βασικό, άλυτο ακόμη πρόβλημα, είναι το αν οι μηχανισμοί αντιγραφής αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα και έξω από την αρχέγονη, με μεταβολικές ικανότητες, κυτταρική δομή και αργότερα ενσωματώθηκαν στο κύτταρο ή αν η ανάπτυξη αυτή συντελέστηκε παράλληλα μέσα στο κύτταρο.

Πρώτο βήμα προς την κυτταρική δομή θα ήταν η κατάλληλη συγκέντρωση των βιομορίων και η περιχαράκωσή τους από το περιβάλλον με πρωτογενείς μεμβρανικούς σχηματισμούς. Όσον αφορά τη συγκέντρωσή τους έχουν προταθεί μηχανισμοί που συμπεριλαμβάνουν κατάψυξη υδατικών διαλυμάτων, και τη δημιουργία πυρήνα με μεγάλη συγκέντρωση ουσιών και αραιό υδάτινο περίβλημα, σχηματισμό μικροφουσαλίδων, συγκέντρωση στην επιφάνεια ανόργανων υλικών, κ.ά. Όσον αφορά τις πρωτόγονες μεμβράνες, θα μπορούσαν λιπίδια (λιπαρά οξέα έχουν ανιχνευθεί σε μετεωρίτες) υπό κατάλληλες συνθήκες – όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα για παρασκευή λιποσωμάτων – να είχαν χρησιμεύσει ως βάση για τα πρώτα κυτταρικά τοιχώματα. Ο Oparin αναμιγνύοντας ελαιώδες υγρό με νερό σχημάτισε κολλοειδή συμπυκνώματα (coacervates), στα οποία αιωρούντο ελαιώδη σταγονίδια, που θεώρησε πρωτόγονες κυτταρικές δομές. Σχετικά με το ενεργειακό ισοζύγιο των αρχέγονων κυττάρων είναι πιθανό ότι η ενεργειακή προσφορά βασιζέτο στην ύπαρξη προσχηματισμένων μορίων (πολυφωσφορικές ενώσεις, πιθανώς και ATP) αργότερα στη βαθμιαία εμφάνιση πρωτεϊνικών μορίων με καταλυτικές ιδιότητες (ενζύμων).

Η διαπίστωση ότι ορισμένα RNA έχουν καταλυτικές ιδιότητες (ριβοζύμες) και το γεγονός ότι η σύνθεση ριβόζης είναι πιο εύκολη διαδικασία απ' αυτή της συνθέσεως δεοξυριβόζης (που απαιτεί βήμα – ενζυμικά καταλυόμενο – αφαίρεσης υδρογόνου), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα πρώτα μόρια με ικανότητα όμοιου αναδιπλασιασμού ήσαν RNA. Ένα υποθετικό σχετικό σενάριο είναι το ακόλουθο: Ένα τυχαίο, υπό αβιοτικές συνθήκες, συντιθέμενο μόριο RNA, που εμφανίζει καταλυτικές ιδιότητες, χρησιμεύει ως καλούπι για τη διάταξη πάνω του νουκλεοτιδίων, σύμφωνα με το σχηματισμό ζευγών βάσεων κατά Watson-Crick. Τα νουκλεοτίδια ακολούθως συνενώνονται σε πολυνουκλεοτίδια χάρις στην καταλυτική δράση του καλουπιού RNA. Οι δύο κλώνοι RNA αποδιατάσσονται και το καταλυτικό RNA αντιγράφει εν συνεχεία το συμπληρωματικό κλώνο του, αναπαράγοντας έτσι τον εαυτό του. Η καταλυτική αντιγραφή τόσο του “καταλύτη”, όσο και του συμπληρωματικού του κλώνου, διατηρεί την επαναλαμβανόμενη αναπαραγωγή και των δύο κλώνων. Η αποδιάταξη του δικλώνου RNA μπορεί να ξεκινήσει εκ νέου τη διαδικασία και το μηχανισμό αντιγραφής. Έχει διατυπωθεί επίσης η υπόθεση ότι τα πρώτα αναπαραγόμενα μόρια RNA ήσαν πυρανόζυλο-RNA, που αντί φουρανοζυλοριβόζης (πενταμελής δακτύλιος) έφεραν πυρανοζυλοριβόζη (εξαμελής δακτύλιος). Κατ' άλλους, τα αρχικά αναπαραγόμενα μόρια είχαν δομή με σκελετό πρωτεϊνών που έφεραν στις πλάγιες αλυσίδες βάσεις του RNA. Σύμφωνα με άλλες θεωρίες τα πρώτα αναπαραγόμενα μόρια δεν ήσαν RNA, αλλά ανόργανα (πηλοί), που έφεραν κατιόντα καταλλήλως διατεταγμένα στην επιφάνειά τους, που μπορούσαν να κατευθύνουν τη σύνθεση νέων στρωμάτων πηλού με όμοια κατανομή κατιόντων. Πάντως, ο κόσμος του RNA αντικαταστάθηκε (με εξαίρεση ορισμένους ιούς) από τον κόσμο του DNA, όπου το DNA απέκτησε τον κεντρικό ρόλο ως γενετικό υλικό, δηλ. ως φορέας των γενετικών πληροφοριών.

Υπάρχουν αρκετές υποθέσεις ως προς το πώς τα νουκλεϊνικά οξέα ανέπτυξαν το ρόλο αυτό, (υπόθεση Eigen), πώς από την άμεση αναγνώριση του πρωτόγονου γενετικού υλικού από τα κωδικευόμενα απ' αυτό αμινοξέα και την πιθανή συμμετοχή του γενετικού υλικού και στη δημιουργία του πεπτιδικού δεσμού, φθάσαμε στην έμμεση αναγνώριση γενετικού υλικού – αμινοξέων μέσω αγγελιοφόρου RNA και μεταφορικών RNA και στην ανάληψη του πρωτεϊνοσυνθετικού ρόλου από τα ριβοσώματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το εύρημα της συμμετοχής του ριβοσωμικού RNA στην καταλυτική διεργασία του σχηματισμού του πεπτιδικού δεσμού.

7. Από τα αρχέγονα κύτταρα στους ευκαρυωτικούς οργανισμούς

Οποιοδήποτε και αν ήταν οι μηχανισμοί, τα πρώτα ζωντανά κύτταρα φαίνεται ότι εμφανίσθηκαν προ τριών δισεκατομμυρίων ετών υπό τη μορφή ετεροτρόφων βακτηριδίων, δηλ. οργανισμών που βασίζοντο από την άποψη παραγωγής ενέργειας στην αναερόβιο διάσπαση (ζύμωση) αβιοτικά προσχηματισμένων χημικών ουσιών. Αργότερα, με την ενσωμάτωση (επίσης αβιοτικά προσχηματισμένων) πορφυρινών, εξελίχθηκαν αυτότροφες μορφές φωτοσυνθετικών βακτηριδίων, που μπορούσαν να εκμεταλλευθούν την ηλιακή ενέργεια για τις συνθετικές τους ανάγκες και λόγω της ανοξικής ατμόσφαιρας ήταν αναγκαστικά αναερόβιοι, χρησιμοποιώντας κυρίως H_2S και γαλακτικό οξύ αντί H_2O . Οι προκαρυωτικοί αυτοί οργανισμοί (προκαρυωτικά είναι τα κύτταρα που δεν έχουν πυρήνα, σε αντίθεση με τα ευκαρυωτικά που έχουν κυτταρικό πυρήνα, βλ. Πίνακα 2) θεωρούνται οι πρόδρομοι των σημερινών φωτοσυνθετικών βακτηριδίων. Περίπου την ίδια εποχή εμφανίσθηκαν βακτηρίδια που δέσμευαν το άζωτο και το χρησιμοποιούσαν για να καλύψουν τις ανάγκες τους σε αζωτούχες ενώσεις. Αυτό γιατί λόγω της ανοξικής ατμόσφαιρας, και επομένως και της ελλείψεως όζοντος, η υπεριάδης ακτινοβολία θα οδηγούσε γρήγορα σε διάσπαση τυχόν υπάρχουσας αμμωνίας σε άζωτο.

Πίνακας 2

Διαφορές Προκαρυωτικών - Ευκαρυωτικών

	<i>Προκαρυωτικά</i>	<i>Ευκαρυωτικά</i>
Υπαρξη κυτταρικού πυρήνα	όχι	ναι
Κυτταρικά οργανίδια (μυτοχόνδρια-χλωροπλάστες)	όχι	ναι
Τρόπος αναπαραγωγής	σχάση	μίτωση ή μείωση
Μεταβολισμός	Αναερόβιος και αερόβιος	αερόβιος
Κυτταρική οργάνωση	Μονοκύτταροι	κυρίως πολυκύτταροι με διαφοροποίηση των κυττάρων

Προ δύο δισεκατομμυρίων ετών εμφανίσθηκαν τα πρώτα αερόβια φωτοσυνθετικά βακτηρίδια, τα πρόδρομα των σημερινών κυανοβακτηριδίων. Η εμφάνισή τους είχε κολοσοισαία επίδραση στην εξέλιξη των κυτταρικών μορφών, λόγω της αλλαγής στη σύσταση της ατμόσφαιρας, που άρχισε να εμπλουτίζεται σε οξυγόνο. Η αύξηση αυτή του οξυγόνου της ατμόσφαιρας οδήγησε στην εξαφάνιση πολλών αναερόβιων οργανισμών, στον περιορισμό τους σε αναερόβια περιβάλλοντα, ή στην προσαρμογή τους στις αερόβιες συνθήκες. Τα κυανοβακτηρίδια εξαπλώθηκαν ευρύτατα και αποτέλεσαν την κύρια μορφή οργανισμών για πολλές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια, δημιουργώντας πλούσια σε οξυγόνο ατμόσφαιρα, και με στρώμα όζοντος, προστατευτικό στις υπεριάδεις ακτινοβολίες. Τα κύτταρα απέκτησαν την ικανότητα να χρησιμοποιούν το οξυγόνο για τις ενεργειακές τους ανάγκες, αναπτύχθηκαν όλοι οι μεταβολικοί κύκλοι των κυττάρων, και η μεγάλη ενεργειακή τους απόδοση. Από τα προκαρυωτικά κύτταρα, με το σχηματισμό του ειδικού ενδοκυτταρικού διαμερίσματος στον οποίον περιορίσθηκε το γενετικό υλικό (του πυρήνα), καθώς και με την ανάπτυξη ειδικών μηχανισμών επεξεργασίας και μεταφοράς

RNA, εξελίχθηκαν τα ευκαρυωτικά (πρωτοευκαρυωτικά). Φαίνεται ότι στα κύτταρα αυτά εισήλθαν αργότερα προκαρυωτικοί οργανισμοί που αναπτύχθηκαν συμβιωτικά, εξελισσόμενοι σε μιτοχόνδρια και σε χλωροπλάστες. Τα κύτταρα που απέκτησαν μόνο μιτοχόνδρια εξελίχθηκαν στα ζωικά κύτταρα, ενώ αυτά με μιτοχόνδρια και χλωροπλάστες σε φυτικά κύτταρα. Τα οργανίδια αυτά πολλαπλασίασαν την ενεργειακή απόδοση των κυττάρων.

Η εμφάνιση των πρώτων ευκαρυωτικών κυττάρων υπολογίζεται ότι έγινε προ 1,5 δισεκατομμυρίων ετών. Τα κύτταρα αυτά, εντελώς αερόβια, απέκτησαν την ικανότητα της μιτωτικής αναπαραγωγής και στα επόμενα 400-500 εκατομμύρια χρόνια εξελίχθηκαν στις διάφορες μορφές πολυκυττάρων οργανισμών, φυλετικά αναπαραγόμενων, πολλές από τις οποίες αναγνωρίζονται ως πρόδρομες μορφές των σύγχρονων φυτών ή ζώων. Από εκεί και πέρα, αρχίζει πια η όμορφη ιστορία της εξελίξεως που κατέληξε στο σημερινό άνθρωπο ως επιστέγασμα, ας το παραδεχτούμε, της δημιουργίας. Όμως οι μηχανισμοί της εξελίξεως, που οδήγησαν στη θαυμαστή ποικιλία των ζώντων οργανισμών, θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο (Η θεωρία της εξελίξεως, Μ. Τύπας).

Βιβλιογραφία

1. A.G. Cairns-Smith: Genetic takeover and the mineral origins of life. Cambridge University Press, New York, Cambridge (1982).
2. F.J. Dyson: A model of origin of life. J. Mol. Evol. 18, 344-350 (1982).
3. M. Eigen, W. Gardiner, P. Schuster and R. Winkler-Oswatitch: The origin of genetic information. Sci. Amer. 244, 88-118 (1981).
4. R.J. Gestel and J.F. Atkins, ed.: The RNA World. Cold Spring Harbor Laboratory Press (1993).
5. L. Margulis: Origin of Eucaryotic cells. Yale University Press, New York, Cambridge (1970).
6. S.M. Miller and L.E. Orgel: The origins of life on earth. Prentic Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. (1974).
7. L.E. Orgel: The origin of life on the earth. Sci. Amer. 271, 53-61, 1994.
8. C. Sagan, S.J. Gould, M. Minsky and S. Weinberg. Life in the Universe. Sci. Amer., 271, 70-77, 1994.