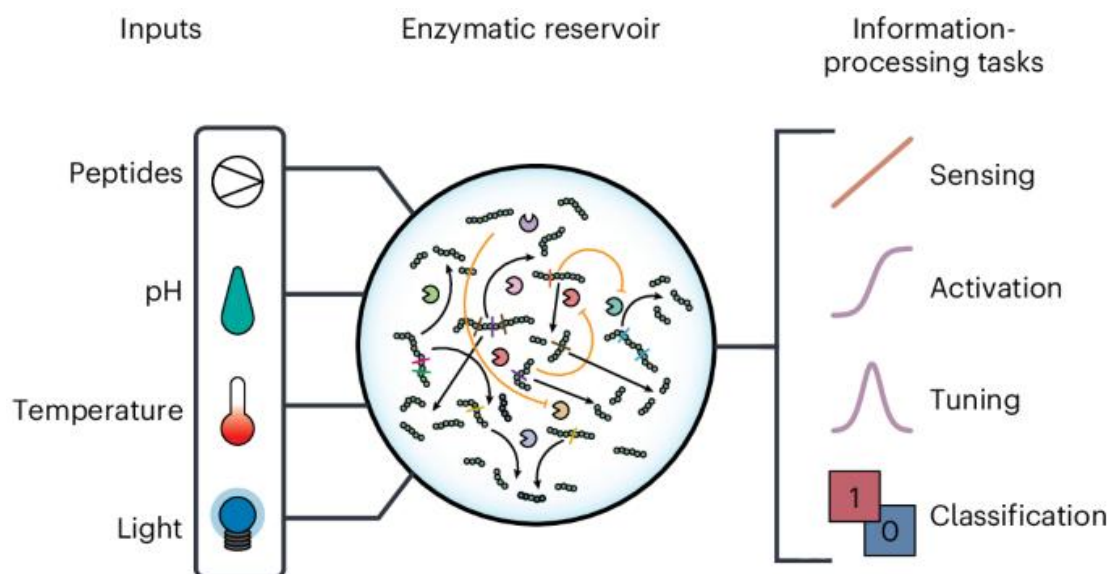


Ένζυμα που υπολογίζουν ως ένα νέο παράδειγμα μοριακής επεξεργασίας πληροφορίας

Δρ Σπύρος Κιτσινέλης

Τα ζωντανά κύτταρα διαθέτουν τη μοναδική ικανότητα να αντιλαμβάνονται, ερμηνεύουν και να αποκρίνονται στο περιβάλλον τους μέσω πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων. Η βιολογική αυτή «νοημοσύνη» βασίζεται σε ένα πλήθος ενζυμικών και φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων που μετατρέπουν ερεθίσματα όπως η θερμοκρασία, το pH ή η παρουσία θρεπτικών ουσιών σε σήματα και αποφάσεις. Η αναπαραγωγή αυτής της ικανότητας σε τεχνητά συστήματα αποτελεί ένα από τα πιο φιλόδοξα πεδία της σύγχρονης συνθετικής βιολογίας. Παρά τις σημαντικές προόδους στον σχεδιασμό τεχνητών ενζυμικών δικτύων, τα περισσότερα μοντέλα μέχρι σήμερα παραμένουν περιορισμένα σε απλές, στατικές δομές και δεν μπορούν να αναπαραγάγουν τη δυναμική πολυπλοκότητα της βιολογικής επεξεργασίας πληροφορίας, όπου η αλληλεπίδραση και ο ανταγωνισμός μεταξύ μορίων δημιουργούν απρόβλεπτες αλλά λειτουργικές συμπεριφορές.



Για να προσεγγιστεί αυτή η φυσική πολυπλοκότητα, ερευνητές παρουσίασαν πρόσφατα μια νέα μεθοδολογία με δίκτυα ενζυμικών αντιδράσεων βασισμένα στην «υπολογιστική δεξαμενή» (reservoir computation). Η έννοια *reservoir computation* προέρχεται από τη νευρομορφική πληροφορική και περιγράφει συστήματα που επεξεργάζονται δεδομένα όχι με αυστηρά προκαθορισμένους κανόνες, αλλά μέσω των δυναμικών τους αλληλεπιδράσεων. Εδώ, τα ένζυμα λειτουργούν ως ένα είδος «χημικού εγκεφάλου», ένα δίκτυο που μπορεί να αναγνωρίζει πρότυπα, να λαμβάνει αποφάσεις και να προσαρμόζεται σε ερεθίσματα χωρίς την ανάγκη προγραμματισμού.

Το δίκτυο που σχεδίασαν οι ερευνητές βασίζεται σε επτά ένζυμα, μεταξύ των οποίων πρωτεάσες όπως η θρυψίνη, η χυμοθρυψίνη και η ελαστάση καθώς και η αλκαλική φωσφατάση. Ως υποστρώματα χρησιμοποιήθηκαν επτά πεπτίδια, καθένα από τα οποία περιείχε πολλαπλές θέσεις υδρόλυσης για δύο ή περισσότερα ένζυμα. Καθώς οι πρωτεάσες διασπούν τα πεπτίδια, τα παραγόμενα θραύσματα μπορούν να λειτουργήσουν ως νέα υποστρώματα, προκαλώντας αναδρομικές και ανταγωνιστικές αντιδράσεις. Αυτή η συνεχής ανατροφοδότηση δημιουργεί ένα μη γραμμικό, αυτοοργανωμένο δίκτυο, ένα χημικό σύστημα που «μαθαίνει» από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Το ενζυμικό αυτό δίκτυο αποδείχθηκε ικανό να εκτελεί πολύπλοκες ταξινομήσεις βάσει των εισερχόμενων πεπτιδικών συνθέσεων, καθώς και λειτουργίες, όπως η αναγνώριση αλλαγών θερμοκρασίας και pH. Μάλιστα, λειτούργησε ως αισθητήρας θερμοκρασίας με ακρίβεια 1,3 °C στο εύρος 25–55 °C, επιδεικνύοντας ταυτόχρονα ικανότητα «λήψης αποφάσεων» και «προσαρμογής», χαρακτηριστικά που παραπέμπουν σε νευρωνικά συστήματα. Εντυπωσιακό είναι ότι η λειτουργία του δικτύου δεν περιορίζεται μόνο σε χημικά ερεθίσματα. Με την ενσωμάτωση φωτοευαίσθητων στοιχείων, οι ερευνητές απέδειξαν ότι το δίκτυο μπορεί να ανταποκρίνεται σε παλμούς φωτός με χρονική ανάλυση από 2 έως 8 λεπτά, ανοίγοντας τον δρόμο για άμεση σύνδεση με οπτικά ή ηλεκτρονικά συστήματα. Με άλλα λόγια, έχουμε να κάνουμε με ένα μικροσκοπικό, μοριακό επεξεργαστή που «αισθάνεται» και «αντιδρά» στο περιβάλλον του, με τρόπο που θυμίζει πρωτόγονα νευρωνικά δίκτυα.

Η πρωτοπορία αυτής της έρευνας δεν περιορίζεται μόνο στη χημική καινοτομία αλλά αντιπροσωπεύει ένα νέο παράδειγμα πληροφορικής στη χημεία, όπου η υπολογιστική ισχύς προκύπτει φυσικά από τις αλληλεπιδράσεις των μορίων χωρίς εξωτερική καθοδήγηση. Το γεγονός ότι τέτοια συστήματα μπορούν να προσαρμόζονται, να διακρίνουν ερεθίσματα και να εκτελούν λειτουργίες που συνήθως αποδίδουμε σε βιολογικούς οργανισμούς, υποδηλώνει ότι βρισκόμαστε στα πρώτα βήματα μιας νέας εποχής, αυτή της μοριακής νοημοσύνης. Οι πιθανές εφαρμογές είναι πολυάριθμες. Από ευαίσθητους βιοαισθητήρες που ανιχνεύουν μεταβολές στο περιβάλλον έως αυτόνομα νανοσυστήματα που ρυθμίζουν χημικές αντιδράσεις σε πραγματικό χρόνο, τα ενζυμικά δίκτυα αυτού του τύπου μπορούν να λειτουργήσουν ως «βιολογικοί υπολογιστές» μέσα σε τεχνητά ή φυσικά περιβάλλοντα. Στο μέλλον τέτοια συστήματα ίσως αποτελέσουν τη βάση για χημικά νευρωνικά δίκτυα, συνδέοντας τον κόσμο της βιολογίας με αυτόν της υπολογιστικής επιστήμης σε επίπεδο μορίου. Η έρευνα αυτή δείχνει πως η φύση εξακολουθεί να εμπνέει τη μηχανική της νοημοσύνης και ότι τα ένζυμα, οι ταπεινοί καταλύτες της ζωής, ίσως αποτελέσουν τα δομικά στοιχεία των «σκεπτόμενων» μορίων του μέλλοντος.

Πηγή

A recursive enzymatic competition network capable of multitask molecular information processing - <https://www.nature.com/articles/s41557-025-01981-y>