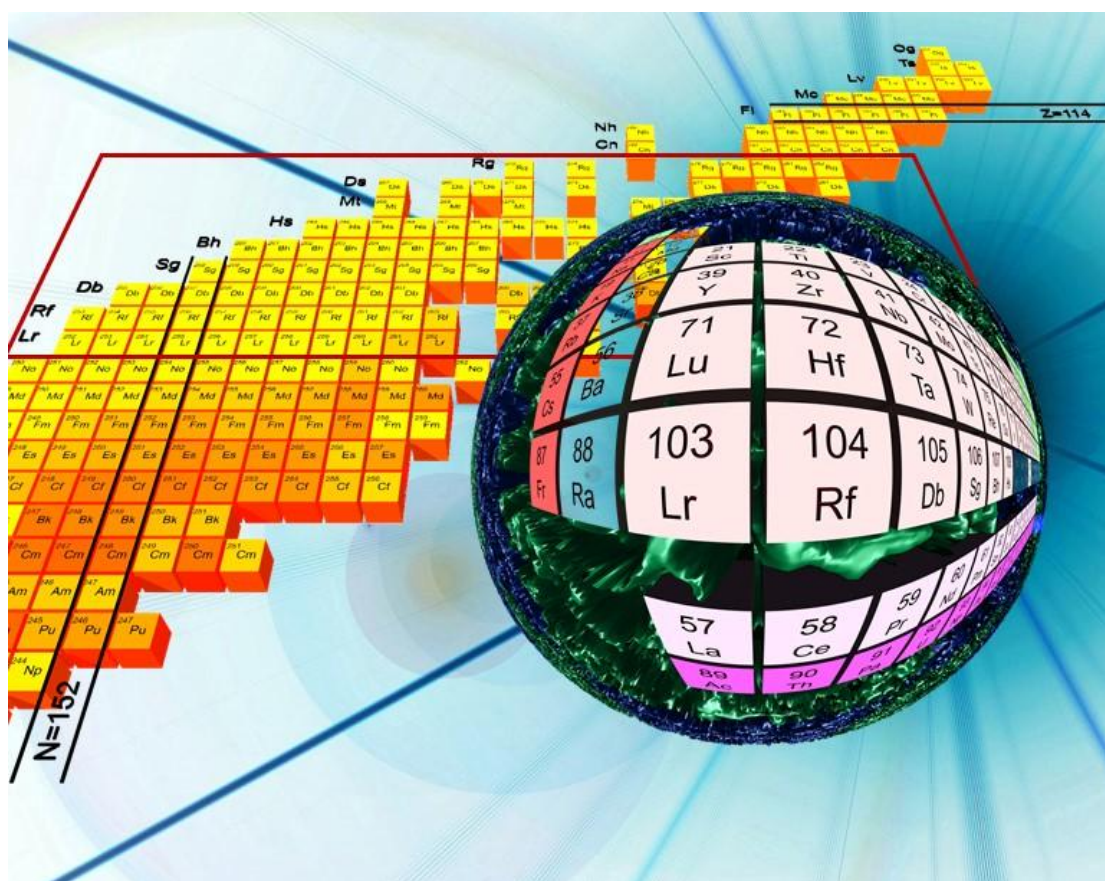


Από τα άστρα στον περιοδικό πίνακα - Η Γένεση των χημικών στοιχείων και το μέλλον της πυρηνικής χημείας με την Τεχνητή Νοημοσύνη

Δρ Σπύρος Κιτσινέλης

Η ύλη που συγκροτεί το σύμπαν, από το οξυγόνο που αναπνέουμε έως τον χρυσό στα κοσμήματά μας, έχει μια κοινή καταγωγή, τα αστέρια. Η σύγχρονη πυρηνική χημεία και αστροφυσική έχουν αποκαλύψει ότι τα χημικά στοιχεία δεν προέκυψαν τυχαία αλλά αποτελούν προϊόντα συγκεκριμένων κοσμικών διεργασιών που συνεχίζονται για δισεκατομμύρια χρόνια. Ταυτόχρονα, η πρόοδος της τεχνητής νοημοσύνης (AI) σίγουρα θα ανοίξει νέους δρόμους στην πρόβλεψη και ανακάλυψη υπερβαρέων στοιχείων, επεκτείνοντας τα όρια του Περιοδικού Πίνακα.



Στην καρδιά κάθε στοιχείου βρίσκεται ο πυρήνας του, που καθορίζεται από τον αριθμό των πρωτονίων και νετρονίων. Η σταθερότητα των πυρήνων εξαρτάται από την ισορροπία αυτών των νουκλεονίων και περιγράφεται ποσοτικά μέσω της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Ο πυρήνας του σιδήρου-56 κατέχει τη μέγιστη ενέργεια σύνδεσης, καθιστώντας το, το σταθερότερο γνωστό νουκλίδιο. Τα στοιχεία ελαφρύτερα του σιδήρου μπορούν να συντηχθούν για να απελευθερώσουν ενέργεια, ενώ τα βαρύτερα μπορούν να διασπαστούν επίσης με εκπομπή ενέργειας.

Αυτή η ενεργειακή καμπύλη εξηγεί γιατί η πυρηνική σύντηξη σταματά στο σίδηρο και οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στα αστέρια, που τροφοδοτούν τη φωτεινότητά τους, είναι εξώθερμες μόνο έως το σίδηρο. Η παραγωγή βαρύτερων στοιχείων απαιτεί περισσότερο ενεργειακά ακραίες συνθήκες.

Τα πρώτα λεπτά μετά το Big Bang δημιούργησαν μόνο τα πιο ελαφρά στοιχεία, δηλαδή υδρογόνο, ήλιο και ίχνη λιθίου. Όλα τα υπόλοιπα σχηματίστηκαν εντός άστρων ή μέσω ακραίων αστρονομικών φαινομένων.

1. **Θερμοπυρηνική σύντηξη σε άστρα:** Παράγει τα στοιχεία έως και τον σίδηρο μέσω διαδοχικών πυρηνικών αντιδράσεων.
2. **Υπερκαινοφανείς (supernovae):** Κατά την κατάρρευση πυρήνα ενός μεγάλου άστρου, παράγονται ακραίες θερμοκρασίες και πυκνότητες νετρονίων. Μέσω της ταχείας σύλληψης νετρονίων (*r*-process), δημιουργούνται στοιχεία όπως ο χρυσός, το ουράνιο και το πλουτώνιο.
3. **Συγχωνεύσεις αστέρων νετρονίων:** Αυτά τα σπάνια γεγονότα συμβάλλουν καθοριστικά στον εμπλουτισμό του διαστήματος με βαρέα στοιχεία.
4. **Αργή σύλληψη νετρονίων (*s*-process):** Λαμβάνει χώρα σε γηρασμένα άστρα και παράγει στοιχεία μέσου ατομικού αριθμού (π.χ. βάριο, στρόντιο).

Το μεγαλύτερο μέρος του Περιοδικού Πίνακα περιλαμβάνει σταθερά ή μακρόβια ραδιενεργά στοιχεία που βρίσκονται στη φύση. Ωστόσο, υπάρχουν και εξαιρέσεις:

- Τεχνητίο ($Z=43$) και προμήθειο ($Z=61$): Δεν διαθέτουν σταθερά ισότοπα. Αν και ελαφριά, δεν βρίσκονται φυσικά στον πλανήτη μας παρά μόνο σε ίχνη.
- Αστατίδιο και φράνκιο: Εξαιρετικά σπάνια και βραχύβια στοιχεία που παράγονται μόνο ως προϊόντα άλλων διασπάσεων.
- Ουράνιο ($Z=92$) και θόριο ($Z=90$): Τα πιο βαριά στοιχεία με φυσικά σταθερά ισότοπα (π.χ. U-238, Th-232) λόγω των πολύ μεγάλων ημιζωών τους (δισ. έτη).

Όλα τα στοιχεία πέραν του $Z=94$ (πλουτώνιο) είναι τεχνητά και δημιουργούνται μόνο σε εργαστήρια ή πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η θεωρητική έννοια του Νησιού Σταθερότητας αναφέρεται στην προβλεπόμενη ύπαρξη υπερβαρέων πυρήνων με “μαγικούς” αριθμούς πρωτονίων και νετρονίων (π.χ. $Z\approx 114$, $N\approx 184$), που μπορεί να έχουν πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα σε σχέση με άλλα υπερβαρέα ισότοπα. Αν και τα έως τώρα παραχθέντα στοιχεία (μέχρι το $Z=118$, ογανεσόνιο) είναι βραχύβια, θεωρείται πιθανό ότι η περιοχή γύρω από το $Z=120-126$ να φιλοξενεί πιο σταθερά νουκλίδια.

Η επιτυχία σε αυτό το πεδίο απαιτεί την ακριβή επιλογή στόχων και βλημάτων, ακραία ενεργειακά περιβάλλοντα και εξελιγμένες τεχνικές ανίχνευσης κάτι που οδηγεί στην επόμενη πρόοδο: την τεχνητή νοημοσύνη.

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) αλλάζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, προβλέπονται και επιβεβαιώνονται πειράματα υπερβαρέων στοιχείων.

- **Μοντέλα πρόβλεψης σταθερότητας:** Με χρήση νευρωνικών δικτύων, AI μπορεί να προβλέψει τις ημιζωές, την ενέργεια σύνδεσης και την πιθανότητα σύντηξης για νέα πυρηνικά συστήματα.
- **Βελτιστοποίηση πειραμάτων:** Μέσω μηχανικής μάθησης, βελτιστοποιείται η επιλογή στόχου, βλήματος, ενέργειας και συνθηκών για την πιθανότερη δημιουργία του επιθυμητού ισότοπου.
- **Ανάλυση δεδομένων:** Οι τεράστιες ποσότητες δεδομένων από ανιχνευτές μπορούν να αναλυθούν ταχύτερα και πιο αξιόπιστα με AI αλγόριθμους, εντοπίζοντας διασπάσεις σπάνιων ισωτόπων που αλλιώς θα περνούσαν απαρατήρητες.

Από τον χρυσό των νετρονιακών συγχωνεύσεων έως τα τεχνητά στοιχεία των εργαστηρίων, η ιστορία των χημικών στοιχείων είναι ταυτόχρονα κοσμική και επιστημονική. Η συνεχής ανακάλυψη στοιχείων, είτε μεσούσης μιας υπερκαινοφανούς έκρηξης είτε μέσα σε ένα επιταχυντή, μας δείχνει ότι ο Περιοδικός Πίνακας παραμένει ανοιχτός στην επέκταση. Με την είσοδο της τεχνητής νοημοσύνης στη σύγχρονη πυρηνική χημεία, το ερώτημα δεν είναι αν και ποια άλλα στοιχεία θα προσθέσουμε, αλλά πότε θα τα ανακαλύψουμε. Και ίσως ο μικρός μου γιος ο Παναγιώτης με τα νέα εργαλεία της εποχής του να καταφέρει ο ίδιος να ανακαλύψει το Βομβάριο και το Μπατάριουμ που επινόησε μαθαίνοντας τον Περιοδικό Πίνακα πριν μερικά χρόνια στο σαλόνι του σπιτιού μας!

Πηγές

1. Kratz, K.-L., Farouqi, K., & Pfeiffer, B. (2007). *Nucleosynthesis: What we have learned and what we still do not understand*. Progress in Particle and Nuclear Physics, 59(1), 147–152.
2. Hofmann, S., & Münzenberg, G. (2000). *The discovery of the heaviest elements*. Reviews of Modern Physics, 72(3), 733–767.
3. Karol, P. J., Barber, R. C., et al. (2016). *Discovery of the elements with atomic numbers $Z = 113–118$* . Pure and Applied Chemistry, 88(1–2), 139–153.
4. Oganessian, Y. T., & Utyonkov, V. K. (2015). *Super-heavy element research*. Reports on Progress in Physics, 78(3), 036301.
5. Jaganathen, Y., Nazarewicz, W., & Satuła, W. (2020). *Machine learning for nuclear structure*. Physics Letters B, 804, 135421.
6. National Nuclear Data Center (NNDC): <https://www.nndc.bnl.gov>