

Project 10

Υπολογισμοί ενεργών διατομών σε αντιδράσεις πυρηνικής αστροφυσικής

Θεωρητικά στοιχεία

Μετά τις πρωτοποριακές εργασίες *abg* [1] και *B2FH* [2], ένας καινούριος τομέας της πυρηνικής φυσικής εδραιώθηκε, με ιδιαίτερη εστίαση στην κατανόηση των κοσμικών διεργασιών που μέσω ενός τεράστιου δικτύου πυρηνικών αντιδράσεων παράγουν όλα τα χημικά στοιχεία και ισότοπα σε αστρικά περιβάλλοντα. Σε πειραματικό επίπεδο η **πυρηνική αστροφυσική** στηρίζεται ιδιαίτερα στις μετρήσεις ενεργών διατομών παραγωγής νέων ισότοπων (μέσω κυρίως αντιδράσεων σύλληψης πρωτονίων, νετρονίων ή φωτοδιασπάσεων, αλλά και διασπάσεων μέσω εκπομπής βαρύτερων πυρήνων ή σχάσης).

Λόγω του μεγάλου αριθμού αντιδράσεων που συμμετέχουν σε τέτοια δίκτυα, η ολική ενεργός διατομή τέτοιων αντιδράσεων μπορεί να προτυποποιηθεί μέσω στατιστικής φυσικής, όπου διάφοροι παράμετροι υπεισέρχονται με καθοριστικό τρόπο, όπως το οπτικό δυναμικό της αντίδρασης, η πυκνότητα πυρηνικών καταστάσεων και η ισχύς εκπομπής ακτίνων γ . Σε σχετικά χαμηλές ενέργειες κέντρου μάζας (1-20 MeV), οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να περιγραφούν από τη θεωρία Hauser-Feshbach [3], η οποία έχει ενσωματωθεί σε εξειδικευμένους κώδικες με τη δυνατότητα ρύθμισης διαφόρων παραμέτρων, ώστε να μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν πυρηνικές αντιδράσεις που αφορούν ισότοπα εμπλεκόμενα στην αστροφυσική διεργασία p (p -process) [4] με χρήση του εξειδικευμένου κώδικα TALYS [5]. Τα ζητούμενα της άσκησης (γενικότερα και ειδικότερα) παρατίθενται ακολούθως.

Μεθοδολογία

- Επισκεφτείτε την ιστοσελίδα της IAEA (αναφορά [5]) και κατεβάστε τον κώδικα TALYS. Συστήνεται ιδιαίτερα η χρήση του κώδικα σε πλατφόρμα linux. Πριν την εγκατάσταση διαβάστε προσεκτικά τις οδηγίες για εγκατάσταση απαιτούμενων βιβλιοθηκών (πχ μέσω apt στο Ubuntu, dnf σε Fedora κτλ)
- Μετά την εγκατάσταση αναζητήστε τις οδηγίες προετοιμασίας του αρχείου εισόδου που περιλαμβάνει τις παραμέτρους που απαιτούνται για την περιγραφή των αντιδράσεων που θα σας ανατεθούν από τον επιβλέποντα. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνονται στο ιδιαίτερα λεπτομερές εγχειρίδιο που συνοδεύει τον κώδικα.
- Θα σας δοθούν αντιδράσεις με αρχικό βλήμα πρωτόνιο ή νετρόνιο και τελικό στάδιο (κανάλι εξόδου) εκπομπή φωτονίου γ . Για τις αντιδράσεις και τα εύρη ενέργειας που σας έχουν ανατεθεί από το διδάσκοντα, υπολογίστε τις ολικές ενεργές διατομές. Απαιτείται η κατάτμηση της περιοχής ενεργειών σε βήματα ενέργειας, π.χ. ανά 10 keV.
- Σχεδιάστε σε κοινό διάγραμμα τα παρακάτω:
 - Τις τιμές των ενεργών διατομών που υπολογίσατε με τον κώδικα TALYS

- b. Διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα (μαζί με τα σφάλματά τους) που μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία. Μια καλή αρχή είναι η βάση πειραματικών δεδομένων EXFOR [6].
- c. Τα όρια του παραθύρου Gamow της κάθε αντίδρασης (δείτε [4] ή [7])
- Καθώς είναι πιθανόν να υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και τους υπολογισμούς σας, επαναλάβετε τους υπολογισμούς επιλέγοντας διαφορετική συνάρτηση πυκνότητας πυρηνικών καταστάσεων (NLD) από τις διαθέσιμες εντός του κώδικα (συμβουλευτείτε το εγχειρίδιο χρήσης).
 - Για καθεμιά από τις διαφορετικές συναρτήσεις, υπολογίστε τις αποκλίσεις θεωρίας-πειράματος (residuals) και σχεδιάστε τις σχετικές γραφικές παραστάσεις των αποκλίσεων ως προς την ενέργεια που έχετε χρησιμοποιήσει
 - Με βάση το βήμα 6 προσπαθήστε να επιλέξετε την καλύτερη συνάρτηση περιγραφής των πειραματικών δεδομένων.
 - Σχολιάστε πιθανά ενδιαφέροντα φαινόμενα που εμφανίζονται στα προηγούμενα βήματα
 - Με βάση την επιλογή σας στο βήμα 7, υπολογίστε και σχεδιάστε τον αστροφυσικό παράγοντα S (S-factor) [7] ως προς την ενέργεια. Χρησιμοποιήστε ημιλογαριθμικό άξονα γ και προεκτείνετε την καμπύλη σας προς χαμηλότερες ενέργειες από αυτές για τις οποίες υπάρχουν πειραματικά δεδομένα. Σχολιάστε αντίστοιχα.

Βιβλιογραφία

- [1] R.A. Alpher, H.A. Bethe, G. Gamow, *The origin of chemical elements*, Phys. Rev. 73, 803 (1948)
- [2] M.E. Burbidge et al., *Synthesis of the elements in stars*, Rev. Mod. Phys. 29, 547 (1957)
- [3] W. Hauser and H. Feshbach, *The Inelastic Scattering of Neutrons*, Phys. Rev. **87**, 366 (1952)
- [4] M. Arnould, and S. Goriely, *The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status*, Phys. Rep. 384, 1 (2003)
- [5] TALYS, <https://nds.iaea.org/talys/>
- [6] EXFOR, <https://www-nds.iaea.org/exfor/>
- [7] C. Iliadis, *Nuclear Physics of Stars*, Wiley & Sons (2015)