

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Ημερομηνία: 2^{ος} – 3^{ος} 2016

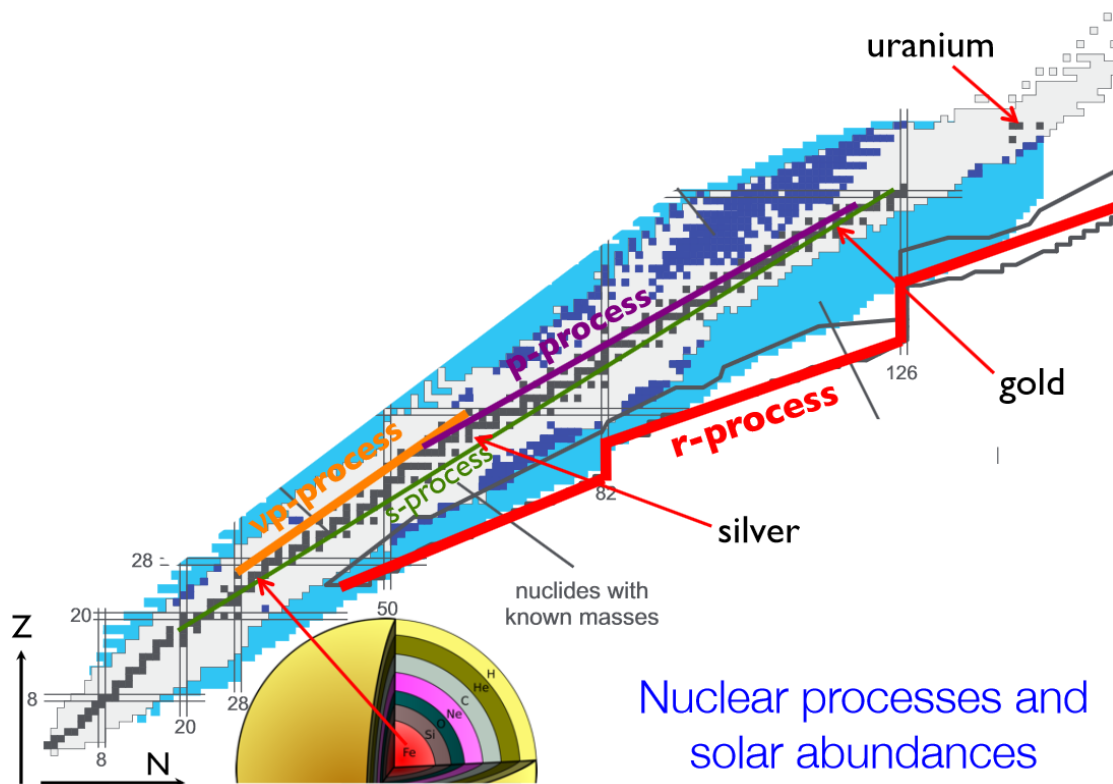
Εργασία μαθήματος Πυρηνικής Φυσικής πάνω στο

p- process στην Πυρηνική Αστροφυσική

Ον/μο σπουδαστή: Αθανάσιος Λάμπας

A.M. : 09107019

Ον/μο επιβλέποντος καθηγητή: Μιχαήλ Κόκκορης



Εισαγωγή

Τρεις βασικές διεργασίες (processes) εντοπίζονται από τις οποίες παράγονται βαριοί πυρήνες από την συνεχή προσθήκη πρωτονίων ή νετρονίων:

s– process («αργά» νετρόνια)

r– process («γρήγορα» νετρόνια)

p– process (πρωτόνια)

Η πρόσληψη πρωτονίων σε ελαφρείς πυρήνες τείνει να παράγει μόνο πυρήνες πλούσιους σε πρωτόνια. Η πρόσληψη νετρονίων σε ελαφρείς πυρήνες παράγει πυρήνες πλούσιους σε νετρόνια, αλλά το ποιοι πυρήνες παράγονται εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίον προστίθενται νετρόνια. Μερικοί πυρήνες παράγονται με περισσότερους από έναν τρόπους.

P- nuclei (P- πυρήνες)

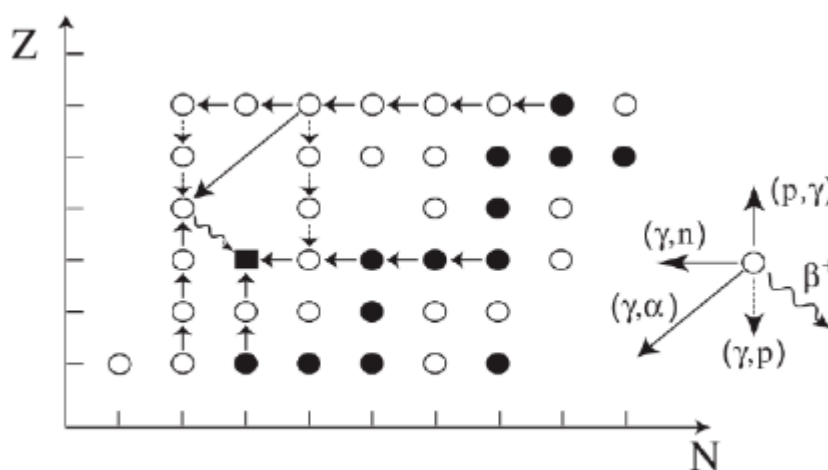
P-nuclei (proton rich) ονομάζονται συγκεκριμένοι ευσταθείς πυρήνες πλούσιοι σε πρωτόνια ($Z \geq 34$), φυσικώς παραγόμενα ισότοπα μερικών στοιχείων μεταξύ του σεληνίου και του υδραργύρου τα οποία δεν μπορούν να παραχθούν απ' την s- ή την r- process. Αυτοί οι πυρήνες εντοπίζονται μόνο στο ηλιακό σύστημα σε ποσοστό όχι μεγαλύτερο του 1% με 0,1% από το εύρος των $Z \geq 34$ πυρήνων που παράχθηκαν κυρίως από τους πιο πλούσιους σε νετρόνια s- και r- πυρήνες. Ισοτοπικές ανωμαλίες που περιλαμβάνουν p- nuclei εντοπίζονται και σε μερικούς μετεωρίτες.

P- process (P- διεργασία)

Ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για τη σύνθεση των p- nuclei ονομάζεται p-process.

Είναι μάλλον λάθος να υποθέσουμε ότι η p -process λαμβάνει χώρα σε ένα συγκεκριμένο φαινόμενο. Μπορούμε να φανταστούμε πολλά περιβάλλοντα της αστροφυσικής, όπου οι συνθήκες είναι κατάλληλες ώστε να μεταβληθεί μια προϋπάρχουσα «αποθήκη» r - και s - nucleί για να σχηματιστούν p -nucleί. Η ερώτηση που προκύπτει είναι στην πραγματικότητα ποιο/α φαινόμενο/α προσδίδει/ουν την πλειονότητα των p - nucleί. Η p -process λαμβάνει χώρα κυρίως σε εκρήξεις supernova τύπου II πιθανότατα, αλλά και μεγάλες συσσωρεύσεις στην επιφάνεια αστέρων νετρονίων που προκαλούν εκρήξεις (bursts) ακτίνων X τύπου I, που φαίνεται επίσης να παράγουν ορισμένα απ τα p - nucleί.

Κατ' αρχήν, υπάρχουν δύο είδη αντιδράσεων τα οποία θα μπορούσαν να επιτρέψουν την παραγωγή πυρήνων φτωχών σε νετρόνια ξεκινώντας από έναν βαρύ αρχικό πυρήνα: σύλληψη πρωτονίου (p, γ), και εκπομπή φωτονίου-νετρονίου (p, n). Ο πρώτος μηχανισμός απαιτεί υψηλές πυκνότητες, θερμοκρασίες και σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, που είναι απίθανο να υφίστανται σε οποιαδήποτε ζώνη πλούσια σε υδρογόνο στα κοινά αστέρια. Έτσι, είναι γενικά αποδεκτό ότι ο κύριος μηχανισμός της παραγωγής p - nucleί συμπεριλαμβάνει φωτοδιάσπαση των βαρέων αρχικών πυρήνων σε ένα θερμό περιβάλλον φωτονίων (θερμοκρασίες κοντά στους $T \sim 2=3 \text{ Gk}$), μια αστρική ζώνη με εξαντλημένο το υδρογόνο και σε μικρή χρονική κλίμακα. Η ροή της αφθονίας φτάνει από το μόλυβδο ως το σίδηρο, όπου περαιτέρω φωτοδιασπάσεις γίνονται ενεργειακά δυσμενείς, στο ίδιο θερμό περιβάλλον φωτονίων.

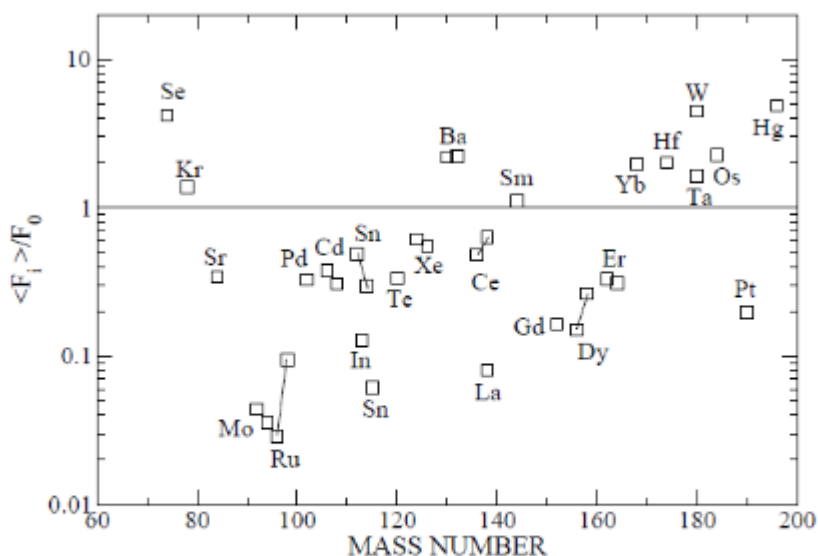


Η διαδρομή για τη δημιουργία ενός p -πυρήνα.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, ο αρχικός πυρήνας έχει πρώτα καταστραφεί από αρκετές αντιδράσεις (γ, n) κατά μήκος μιας δεδομένης ισοτοπικής αλυσίδας. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί ένας πυρήνας ελλειπής σε νετρόνια που προτιμά μια (γ, p) ή μια (γ, α) αντί για μια (γ, n) αντίδραση, έτσι διακλαδώνοντας τη ροή αφθονίας σε μια ισοτοπική αλυσίδα ενός ελαφρύτερου στοιχείου. Οι αφθονίες έχουν την τάση να συσσωρεύονται σε αυτά τα σημεία διακλάδωσης, ειδικά σε

νουκλίδια με κλειστή δομή φλοιού νετρονίων ή πρωτονίων. Αυτά τα σημεία γίνονται είτε απευθείας p- nucleί, όπως φαίνεται και στο σχήμα (στην περιοχή των ελαφρύτερων p-nuclei), είτε μεταλλάσσονται μέσω β^+ αποδιεγέρσεων σε p- nucleί ύστερα από ψύξη, επέκταση και εκτόξευση υλικού (στην περιοχή των βαρέων p- nucleί).

Είναι σημαντικό για οποιαδήποτε ρεαλιστική περιοχή υπεύθυνη για τη σύνθεση των p- nucleί ότι ο συνδυασμός θερμοκρασίας και χρονικής κλίμακας εγγυάται την εμφάνιση κάποιων φωτοδιασπάσεων, όχι τόσο έντονων ώστε να μειώσει όλους τους πυρήνες στα είδη της κορυφής του σιδήρου. Αυτά τα επιχειρήματα υποστηρίζουν το συμπέρασμα ότι η p- process συμβαίνει κατά τη διάρκεια αστρικών εκρήξεων που συνδέονται σε ταχεία επέκταση και ψύξη του υλικού. Παρότι η/οι περιοχή/ες της p- process δεν έχουν προσδιοριστεί με σαφήνεια ακόμα, όπως ήδη αναφέραμε, πολλές έρευνες έχουν υποθέσει ότι συμβαίνει σε υπερκαινοφανείς λόγω της κατάρρευσης του πυρήνα ενός άστρου, όταν το κρουστικό κύμα περνάει τη ζώνη οξυγόνου-νέου και θερμαίνει το υλικό σε θερμοκρασία μεταξύ 2-3 GK. Κατά τη διάρκεια της έκρηξης, διαφορετικά επίπεδα αυτής της ζώνης υπόκεινται σε διαφορετικές θερμοδυναμικές διαδικασίες και έτσι επιτυγχάνονται διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασιών. Η ασθενής συνιστώσα της s- process που λειτουργεί κατά τη διάρκεια του πυρήνα ηλίου και των σταδίων καύσης φλοιών άνθρακα ενισχύει έντονα την p- process στην περιοχή των μαζών $A \sim 60 - 90$. Έχει δειχθεί ότι τα p- nucleί με μάζες $A \sim 92$, $A \sim 92 - 144$ και $A \sim 144$ παράγονται κυρίως σε αστρικές ζώνες με μέγιστη θερμοκρασία $T_a \geq 3$ GK, $T \sim 2,7 - 3,0$ GK και $\leq 2,5$ GK, αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα κάθε p- nucleί συντίθεται σε μια σχετικά στενή θερμοκρασιακή περιοχή.



Μέσος κανονικοποιημένος παράγοντας υπερπαραγωγής των p-πυρήνων από δίκτυο υπολογισμών με σταθερούς ρυθμούς αντιδράσεων.

Οι προσομοιώσεις αναπαράγουν τις αφθονίες που παρατηρούνται στο ηλιακό σύστημα για τα περισσότερα p -nuclei με έναν παράγοντα 2-3. Ωστόσο υπάρχει μια σημαντική υποπαραγωγή για τα ελαφριά p -nuclei ^{92}Mo , ^{94}Mo , ^{96}Ru και ^{98}Ru , όπως και για τα σπάνια είδη ^{113}In , ^{115}In και ^{138}La . Περιοχές εκτός των μαζικών αστέρων έχουν ληφθεί υπ' όψιν και, περιέργως, παρόμοιες αφθονίες p -nuclei μπορεί κατά κύριο λόγο να συντίθενται με διαφορετικό μηχανισμό (π.χ. την vp -process που θα αναφέρουμε παρακάτω).

vp -process

Την τελευταία δεκαετία έχουν προταθεί νέες διαδικασίες πυρηνοσύνθεσης, με σκοπό να λύσουν προβλήματα που προέκυπταν από τις ήδη υπάρχουσες. Μια από αυτές τις διαδικασίες, που πλέον θεωρείται υποκατηγορία της p -process είναι η λεγόμενη vp -process (vp -διεργασία) που προτάθηκε από τον Frohlich και άλλους το 2006. Η vp -process λαμβάνει χώρα σε υπερκαινοφανείς (και πιθανόν σε gamma-ray bursts – GRB) όταν ισχυρές ροές νετρίνων δημιουργούν εκτοξεύσεις πλούσιες σε πρωτόνια. Οι απορροφήσεις αντινετρίνων στο πλούσιο σε πρωτόνια περιβάλλον δημιουργούν νετρόνια, τα οποία συλλαμβάνονται αμέσως από πυρήνες φτωχούς σε νετρόνια. Αυτή η διεργασία επιτρέπει την πυρηνοσύνθεση πυρήνων με μαζικούς αριθμούς $A > 64$, και αποτελεί πιθανή εξήγηση για την προέλευση των ηλιακών περιεκτικότητων των ^{92}Mo , ^{94}Mo , ^{96}Ru και ^{98}Ru . Ακόμα προσφέρει μια φυσική εξήγηση για την μεγάλη περιεκτικότητα Sr σε αστέρες φτωχούς σε υπερ-μέταλλα.

rp -process

Η διεργασία ταχείας σύλληψης πρωτονίου (rp -process) είναι η κυρίαρχη διεργασία πυρηνοσύνθεσης και παραγωγής ενέργειας σε σενάρια εκρηκτικής καύσης υδρογόνου. Αρχίζοντας από το ξέσπασμα ενός κύκλου CNO, βαρύτεροι πυρήνες σχηματίζονται από μια σειρά πρωτονιακών συλλήψεων και β -αποδιεγέρσεων. Η διεργασία αυτή διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο για τα X-ray bursters, τα οποία αποτελούνται από έναν αστέρα νετρονίων και έναν συνοδό. Όταν υλικά πλούσια σε υδρογόνο και ήλιο από το συνοδό προσαρτώνται στην επιφάνεια του αστέρα νετρονίων, ενεργοποιείται τελικά μια εκρηκτική καύση υδρογόνου σε κρίσιμες θερμοκρασίες και πυκνότητες.

Βιβλιογραφία – παραπομπές

<http://www2011.mpe.mpg.de/gamma/science/tu-lectures/EuroGenesis13/Arcones.pdf>

http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?bibcode=1990A%26A...227..271R&db_key=AST&page_ind=0&data_type=GIF&type=SCREEN_VIEW&classic=YES

S. E. Woosley and W. M. Howard. The p-process in supernovae. , 36:285–304, February 1978. doi:10.1086/190501.

M. Arnould and S. Goriely. The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status. Physics Reports, 384(1–2):1 – 84, 2003.ISSN 0370-1573. doi: 10.1016/S0370-1573(03)00242-4.

Jordi José and Christian Iliadis. Nuclear astrophysics: the unfinished quest for the origin of the elements. Reports on Progress in Physics, 74(9):096901, 2011.

M Rayet, M Arnould, M Hashimoto, N Prantzos, and K Nomoto. The p-process in Type II supernovae. Astronomy and Astrophysics, 298:517, 1995.

W. Rapp, J. Görres, M. Wiescher, H. Schatz, and F. Käppeler. Sensitivity of p-Process Nucleosynthesis to Nuclear Reaction Rates in a 25 M solar Supernova Model. , 653:474–489, December 2006. doi:10.1086/508402.

C. Fröhlich, G. Martínez-Pinedo, M. Liebendörfer, F.-K. Thielemann, E. Bravo, W. R. Hix, K. Langanke, and N. T. Zinner. Neutrino-induced nucleosynthesis of $A \geq 64$ nuclei: The νp process. Phys. Rev. Lett. , 96:142502, Apr 2006. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.142502

Αθανάσιος Ψάλτης - Πτυχιική εργασία: Πειραματικές μελέτες ενεργών διατομών και γωνιακών κατανομών της $^{112}\text{Cd}(p,\gamma)^{113}\text{In}$ με εφαρμογή στην πυρηνοσύνθεση