

Συνοπτική Ανάλυση Δημοσιεύσεων του Δρ. Γ.Α. Σουλιώτη

A. Διδακτορική Διατριβή

“Study of Projectile Fragmentation Reactions at Intermediate Energies.”
Chemistry Department, Michigan State University, 1992.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί μια από τις πρώτες συστηματικές μελέτες του μηχανισμού πυρηνικής αντιδράσεως θραύσεως βλήματος σε μετρίως υψηλές ενέργειες (20 – 100 MeV/νουκλεόνιο. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο NSCL (National Superconducting Cyclotron Laboratory) του Πολιτειακού Πανεπιστημίου του Michigan. Οι δέσμες ιόντων παρήχθησαν από το υπεραγωγίμο κύκλοτρο K1200 και προσέκρουσαν σε στόχο στην έξοδο του επιταχυντού. Τα θραύσματα των αντιδράσεων μελετήθηκαν με δύο διαφορετικές πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν ως φασματογράφοι μαζών: α) μια απλή (προσωρινή) γραμμική δέσμη και β) τον διαχωριστή μαζών A1200. Οι μετρήσεις με τη διάταξη (α) περιγράφονται επίσης στη δημοσίευση [1], ενώ οι αντίστοιχες της διατάξεως (β) αναπτύσσονται επίσης στις εργασίες [2,3,5]. Οι κύριες ιδιότητες των θραυσμάτων βλήματος (projectile-like fragments) που μετρήθηκαν ήταν οι κατανομές ορμών και οι διαφορικές ενεργές διατομές σε γωνίες κοντά στις 0° ως προς την κατεύθυνση της δέσμης.

Η συστηματική μελέτη και ερμηνεία αυτών των ιδιοτήτων έχει συμβάλλει στην ακριβή πρόβλεψη του ρυθμού παραγωγής δεσμών ραδιενεργών πυρήνων (radioactive nuclear beams, RNB) όχι μόνο στο εργαστήριο NSCL, αλλά και σε άλλα διεθνή εργαστήρια. Είναι αξιοσημείωτο ότι με την παραγωγή και την χρήση ραδιενεργών δεσμών έχει καταστεί δυνατή η μελέτη της δομής πολύ ασταθών (“εξωτικών”) πυρήνων και των αντιδράσεων τους. Το ερευνητικό αυτό πεδίο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα της σύγχρονης πυρηνικής έρευνας και έχει άμεση εφαρμογή, μεταξύ άλλων, στο πεδίο της αστροφυσικής (προέλευση και παραγωγή των χημικών στοιχείων, παραγωγή ενεργείας στους αστέρες και δυναμική της εξελίξεώς τους).

B. Πρωτότυπες Εργασίες σε Διεθνή Περιοδικά με Κριτάς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις (σε περιοδικά με κριτάς – ομάδα B του καταλόγου δημοσιεύσεων) κατά θεματική ενότητα και περιγράφονται σύντομα τα ερευνητικά θέματα και η σημασία τους.

Οι εργασίες ταξινομούνται περαιτέρω σε δύο κατηγορίες I και II. Η κατηγορία I περιλαμβάνει τις εργασίες που αφορούν την κύρια ερευνητική δραστηριότητά μου με την μέγιστη από μέρους μου συνεισφορά. Η κατηγορία II περιλαμβάνει ερευνητική δραστηριότητα που προκύπτει από συνεργασίες σε πειραματικές μετρήσεις, ανάλυση δεδομένων και θεωρητική ερμηνεία τους.

Κατηγορία Εργασιών I

I.1. Study of projectile fragmentation reactions. Production of light radioactive beams.
Εργασίες [1,2,3,5].

Οι εργασίες [1,2,5] αποτελούν ολοκλήρωση και δημοσίευση των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής. Το πειραματικό μέρος περιλαμβάνει την ανάπτυξη της μεθόδου διαχωρισμού, ανιχνεύσεως και λήψεως των κατανομών των θραυσμάτων δέσμης με τη

χρήση μαγνητικού φασματογράφου μάζης. Η ανάλυση των κατανομών ορμών των θραυσμάτων ερμηνεύθηκε με την πρόταση ενός απλού μοντέλου βασισμένου στην αρχή διατήρησης της ορμής και στην κινήση Fermi των νουκλεονίων μέσα στο βλήμα και τον στόχο. Παρατηρήθηκε ότι ο μηχανισμός της αντιδράσεως στην παρούσα περιοχή ενέργειας (~ 80 MeV/nucleon) περιλαμβάνει εκτός από την “καθαρή” θραύση του βλήματος (pure projectile fragmentation – όμοια με την θραύση που παρατηρείται σε υψηλές ενέργειες, ~ 1 GeV/nucleon) άμεση απόσπαση (direct stripping) και άμεση πρόσληψη (direct pick-up) νουκλεονίων. Ο μηχανισμός προσλήψεως νουκλεονίων (ο οποίος δεν έχει παρατηρηθεί σε υψηλές ενέργειες) παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στην παρούσα μελέτη και παρουσιάζει ομοιότητες με τον αντίστοιχο μηχανισμό χαμηλών ενεργειών (5 - 15 MeV/nucleon).

Η εργασία [3] αποτελεί συνοπτική παρουσίαση της συστηματικής μελέτης των αντιδράσεων θραύσεως βλήματος και του τρόπου παραγωγής και διαχωρισμού ελαφρών ραδιενεργών δεσμών με τον φασματογράφο A1200 στο εργαστήριο NSCL. Περιγράφεται η παραγωγή νέων πυρήνων πολύ πλούσιων σε πρωτόνια στην περιοχή ατομικού αριθμού $Z=31-38$ [κοντά στην γραμμή κόρου πρωτονίων (proton drip-line) - όπου η ενέργεια συνδέσεως του τελευταίου πρωτονίου μηδενίζεται]. Επίσης αναφέρεται η παραγωγή και μελέτη ελαφρών πυρήνων πολύ πλούσιων σε νετρόνια οι οποίοι εμφανίζουν το φαινόμενο της άλω νετρονίων (neutron-halo nuclei, π.χ. ^{11}Li , βλέπε κατωτέρω).

I.2. Fission of ^{238}U projectiles below the Fermi energy (~20 MeV/nucleon). Εργασία [8].

Αποτελεί την πρώτη επιτυχή προσπάθεια παραγωγής και διαχωρισμού σπανίων πυρήνων πολύ πλούσιων σε νετρόνια, οι οποίοι προκύπτουν από την σχάση βλήματος ^{238}U στην περιοχή ενεργείας δέσμης ~20 MeV/nucleon. Η αντίδραση που μελετάται είναι $^{238}\text{U} + ^{208}\text{Pb}$. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο NSCL με τον φασματογράφο μαζών A1200. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο μηχανισμός που ακολουθείται είναι σύμφωνος με πλήρως ανελαστική σκέδαση και επόμενη σχάση του βλήματος ^{238}U . Σχολιάζεται η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου στην παραγωγή σπανίων πυρήνων σε εργαστήρια επιταχυντών μετρίως υψηλών ενεργειών (20 – 100 MeV/nucleon) και η σημασία στη μελέτη της δομής πλουσίων σε νετρόνια πυρήνων που λαμβάνουν μέρος στην αστροφυσική διεργασία r (r-process).¹

I.3. Fragmentation of heavy-element beams at ~20 MeV/nucleon. Εργασίες [11,13,16].

Συστηματική μελέτη του μηχανισμού αντιδράσεως βαρέων δεσμών (συγκεκριμένα δέσμης ^{197}Au) στην περιοχή ενεργείας ~20 MeV/nucleon. Η [11] αναφέρεται στις αντιδράσεις $^{197}\text{Au} + ^{12}\text{C}$ και $^{197}\text{Au} + ^{27}\text{Al}$ στις οποίες επικρατεί ο μηχανισμός μερικής συντήξεως (incomplete fusion) του ελαφρού στόχου με το βλήμα. Στην [16] παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις για την αντίδραση $^{197}\text{Au} + ^{90}\text{Zr}$ (που ακολουθεί μηχανισμό ανελαστικής σκεδάσεως) και συγκρίνονται με θεωρητικούς υπολογισμούς. Η [13] αναφέρεται στην εφαρμογή αυτών των αντιδράσεων για την παραγωγή σπανίων πυρήνων πολύ πλούσιων σε πρωτόνια κατά μήκος και πέραν της proton drip-line. Οι πυρήνες αυτοί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κυρίως για δύο λόγους α) εξαιτίας του φαινομένου της

¹ r-process: rapid neutron capture process – διεργασία ταχείας συλλήψεως νετρονίων: είναι από τις πιο σημαντικές αστροφυσικές διεργασίες συνθέσεως των χημικών στοιχείων βαρύτερων του σιδήρου ($Z=26$) και συμβαίνει κατά τις εκρήξεις supernova. Αποτελεί σήμερα διεθνώς αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας στον χώρο της Αστροφυσικής.

αυθόρμητης εκπομπής πρωτονίου (proton radioactivity) το οποίο παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη δομή των πυρήνων (κυρίως με μαζικό αριθμό $A > 100$) και β) εξαιτίας της αστροφυσικής σημασίας των μεσοβαρών πυρήνων (με $A < 100$) κυρίως στην αστροφυσική διεργασία rp (rp -process, rapid proton capture, διεργασία ταχείας συλλήψεως πρωτονίου).

I.4. Production of neutron-rich nuclides in peripheral collisions below the Fermi energy. Understanding of the reaction mechanism. Εργασίες [17,18,21,25], [40,46] και [66,67,73]

Η ομάδα αυτή των εργασιών αναφέρεται στην ανάπτυξη νέας μεθόδου παραγωγής πυρήνων πλουσίων σε νετρόνια στο εργαστήριο Cyclotron Institute του Παν/μίου Texas A&M. Χρησιμοποιήθηκαν δέσμες ιόντων από το υπεραγωγικό κύκλοτρο K500 και τα προϊόντα αντιδράσεως αναλύθηκαν με τον φασματογράφο μάζης MARS. Η μελέτη των ενεργών διατομών των προϊόντων έδειξε ότι ο μηχανισμός περιλαμβάνει περιφερειακή ανταλλαγή νουκλεονίων (peripheral nucleon exchange). Στις εργασίες [17,18] μελετάται κυρίως η αντίδραση $^{86}\text{Kr}(25\text{MeV/nucleon}) + ^{64}\text{Ni}$. Στην εργασία [21] μελετώνται οι αντιδράσεις $^{86}\text{Kr}(25\text{MeV/nucleon}) + ^{124}\text{Sn}, ^{112}\text{Sn}$ και οι ενεργές διατομές των προϊόντων συγκρίνονται με αυτές της [17].

Οι εργασίες [25,66,67] αποτελούν συνοπτική παρουσίαση των παραπάνω μελετών. Στην [40] δίνεται θεωρητική ερμηνεία των αποτελεσμάτων με βάση το μοντέλο ανταλλαγής νουκλεονίων σε περιφερειακές αντιδράσεις ανελαστικής σκεδάσεως (deep-inelastic transfer – DIT). Η [46] αποτελεί προσπάθεια θεωρητικής ερμηνείας της παραγωγής προϊόντων πλουσίων σε νετρόνια με ατομικό αριθμό $Z = 20-30$ από τις αντιδράσεις $^{86}\text{Kr} + ^{124}\text{Sn}, ^{112}\text{Sn}$. Τέλος η εργασία [73] αναφέρεται σε συστηματικούς υπολογισμούς περιφερειακών αντιδράσεων σε χαμηλότερες ενέργειες, συγκεκριμένα στην περιοχή πάνω από το φράγμα Coulomb ($\sim 5\text{MeV/nucleon}$).

Η μελέτη που εκτίθεται σε αυτές τις εργασίες οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, οι περιφερειακές αντιδράσεις στην περιοχή ενεργείας βλήματος κάτω από την πυρηνική ενέργεια Fermi ($\sim 35\text{MeV/nucleon}$) συνιστούν ένα νέο και σημαντικό τρόπο παραγωγής σπανίων πυρήνων πολύ πλουσίων σε νετρόνια και μπορούν να εφαρμοστούν σε εργαστήρια επιταχυντών μετρίως χαμηλών ενεργειών ($10-25\text{MeV/nucleon}$) όπως το Texas A&M, Argonne National Laboratory (Η.Π.Α.), GANIL (Γαλλία), Legnaro (Ιταλία) και άλλα.

I.5. Rare isotope production and the radioactive-beam upgrade of the Cyclotron Institute at Texas A&M. Εργασίες [49, 54-56, 58].

Δίδεται συνοπτική παρουσίαση της μεθόδου παραγωγής ραδιενεργών δεσμών με τον μηχανισμό περιφερειακής ανταλλαγής νουκλεονίων (βλέπε ανωτέρω). Επίσης περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου στο Cyclotron Institute του Texas A&M κατά την αναβάθμιση του εργαστηρίου προς την κατεύθυνση παραγωγής ραδιενεργών δεσμών σπανίων πυρήνων.

I.6. Spectrometer design and rare-isotope production for a next generation RIB Facility. Εργασία [57].

Σχεδιασμός φασματογράφου μάζης μεγάλης στερεάς γωνίας, ειδικά για την εφαρμογή σε αντιδράσεις περιφερειακής ανταλλαγής νουκλεονίων, με την χρήση ραδιενεργών δεσμών πυρήνων πλουσίων σε νετρόνια. Η πειραματική αυτή διάταξη προτείνεται για το προσεχές εθνικό εργαστήριο FRIB (Facility for Rare Isotope Beams) στις Η.Π.Α., το οποίο θα παρέχει

δέσμες σπανίων πυρήνων για τη μελέτη της δομής και των αντιδράσεων. Θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί, μεταξύ άλλων, στο Argonne National Laboratory (Η.Π.Α) και στο GANIL (Γαλλία) στα πλαίσια της αναβάθμισης των εν λόγω εργαστηρίων προς την κατεύθυνση παραγωγής ραδιενεργών δεσμών.

I.7. Production of very neutron-rich nuclides in peripheral collisions at 15 MeV/nucleon. Εργασίες [74] και [Γ2].

Ως συνέχεια της μελέτης παραγωγής σπανίων ισοτόπων πλούσιων σε νετρόνια, στην εργασία [74] παρουσιάζονται οι μετρήσεις ενεργών διατομών πυρήνων πλούσιων σε νετρόνια που παρήχθησαν από τα θραύσματα βλήματος κατά τις περιφερειακές αντιδράσεις δέσμης ^{86}Kr στα 15 MeV/nucleon με στόχους ^{64}Ni , ^{58}Ni καθώς και ^{124}Sn , ^{112}Sn . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Παν/μιο Texas A&M με τον φασματογράφο μάζας MARS σε γωνίες σκεδάσεως 4° και 7° . Η ανάλυση των δεδομένων έγινε κατ' εξοχήν στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας του τμήματος μας μετά από εγκατάσταση και με χρήση των καταλλήλων λογισμικών πακέτων. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον το γεγονός ότι στα 15 MeV/nucleon, παρατηρήθηκαν θραύσματα του βλήματος τα όποια έλαβαν από το στόχο μεγάλο αριθμό νετρονίων (έως και 8), παρέχοντας τη δυνατότητα παραγωγής εξαιρετικά σπανίων πυρήνων.

Η εργασία Γ2 αποτελεί μέρος της ερευνητικής διατριβής master του μεταπτυχιακού φοιτητού Παγαγιώτη Φουντά την όποια εκπόνησε υπο την επίβλεψή μου. Σε αυτήν παρουσιάζεται συστηματική θεωρητική περιγραφή των ενεργών διατομών των σπανίων πυρήνων που παρήχθησαν κατά τις ανωτέρω αντιδράσεις στα 15 MeV/nucleon και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της [74]. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν ο φαινομενολογικός κώδικας DIT (Deep-Inelastic Transfer καθώς και η βελτιωμένη του έκδοση [40]) και ο μικροσκοπικός κώδικας CoMD (Constrained Molecular Dynamics) σε συνδυασμό με τον κώδικα στατιστικής αποδιέγερσης SMM (Statistical Multifragmentation Model). Η μελέτη αυτή έδειξε ότι με τον κώδικα CoMD επιτυγχάνεται ικανοποιητική περιγραφή του μηχανισμού των περιφερειακών αντιδράσεων και ιδιαίτερος των ενεργών διατομών των παραγομένων σπανίων πυρήνων. Συνεπώς, παρέχεται η δυνατότητα να προβλέψουμε με αξιοπιστία την παραγωγή σπανίων πυρήνων που μπορούν να προκύψουν από περιφερειακές αντιδράσεις ανταλλαγής νουκλεονίων σε αυτήν την περιοχή ενεργειών με την χρήση ραδιενεργών δεσμών, οι οποίες θα καταστούν διαθέσιμες στο άμεσο μέλλον από διεθνή εργαστήρια όπως ήδη αναφέραμε ανωτέρω.

I.8. Studies of peripheral collisions below the Fermi energy via high-resolution measurements of projectile residues. The process of N/Z equilibration and the role of the symmetry energy. Εργασίες [22,30,31] και [Γ1]

Η ομάδα αυτή των εργασιών αναφέρεται στην συστηματική μελέτων των κατανομών των ενεργών διατομών των θραυσμάτων βλήματος σε αντιδράσεις περιφερειακές και ημιπεριφερειακές (με μικρότερη παράμετρο κρούσεως από αυτή των περιφερειακών αντιδράσεων) σε ενέργεια βλήματος ~ 25 MeV/nucleon. Για την ανάλυση εφαρμόζεται η τεχνική του isoscaling (isotopic scaling). Το isoscaling αναφέρεται στην σχέση του λόγου των ενεργών διατομών ενός προϊόντος από δύο διαφορετικές αντιδράσεις που αντιστοιχούν στην ίδια θερμοκρασία (η σχέση αυτή είναι εκθετική ως προς N ή Z - βλέπε ορισμό π.χ. στην εργασία [22]). Στην [22] δίνεται η συστηματική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων του isoscaling για τα βαρέα θραύσματα βλήματος των αντιδράσεων $^{86}\text{Kr}(25\text{MeV/nucleon}) + ^{124}\text{Sn}$, ^{112}Sn και $^{86}\text{Kr}(25\text{MeV/nucleon}) + ^{64}\text{Ni}$, ^{58}Ni .

Στις εργασίες [30] και [31] προτείνεται πρωτότυπη πειραματική μέθοδος μελέτης της πορείας προς χημική ισορροπία ως προς τον βαθμό ελευθερίας N/Z (process of N/Z equilibration). Η μέθοδος βασίζεται στο isoscaling βαρέων θραυσμάτων βλήματος από περιφερειακές και ημιπεριφερειακές αντιδράσεις όπως οι ανωτέρω. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με προβλέψεις θεωρητικών μοντέλων των αντιδράσεων. Υπολογισμοί προς αυτή την κατεύθυνση (με μοντέλα τύπου QMD – Quantum Molecular Dynamics) αποτελούν σημαντική τρέχουσα δραστηριότητά μας και πρώτα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εργασία [66].

Τέλος στην εργασία Γ1 (που πρόκειται να υποβληθεί προς δημοσίευση στο Physical Review C) παρουσιάζεται η ανάλυση του isoscaling των θραυσμάτων βλήματος από τα ζεύγη των αντιδράσεων [74] του ^{86}Kr (15 MeV/nucleon) με $^{64,58}\text{Ni}$ και $^{124,112}\text{Sn}$, η πειραματική εξαγωγή της πορείας της N/Z equilibration και η σύγκριση με τις προβλέψεις των μοντέλων DIT και CoMD. Επι του παρόντος, η εξάρτηση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών του CoMD από τις παραμέτρους της χρησιμοποιούμενης φαινομενολογικής αλληλεπίδρασης νουκλεονίου-νουκλεονίου αποτελεί αντικείμενο λεπτομερούς μελέτης της ερευνητικής ομάδος μου.

I.9. Projectile residues as probes of the nuclear symmetry energy of hot nuclei undergoing multifragmentation. Εργασίες [20] και [41,48,51].

Κατ' αρχάς στην εργασία [20] μελετώνται οι κινηματικές ιδιότητες βαρέων θραυσμάτων βλήματος της αντιδράσεως $^{124}\text{Sn}(20\text{MeV/nucleon}) + ^{27}\text{Al}$ και συγκρίνονται με θεωρητικούς υπολογισμούς που βασίζονται στο μοντέλο SMM (statistical multifragmentation model). Εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι διηγευμένοι πυρήνες με ενέργεια διεγέρσεως μεγαλύτερη από ~ 2 MeV/nucleon διασπώνται κυρίως με μηχανισμό ταυτόχρονης πολλαπλής θραύσεως (simultaneous multifragmentation), επιβεβαιώνοντας ότι αυτή η τιμή ενεργείας διεγέρσεως αντιστοιχεί στο κατώφλιο του μηχανισμού πολλαπλής θραύσεως (multifragmentation threshold).

Οι εργασίες [41,48,51] εστιάζονται στην μελέτη της ενεργείας συμμετρίας¹ διηγευμένων πυρήνων με ενέργεια διεγέρσεως μεγαλύτερη από ~ 2 MeV/nucleon (nuclear multifragmentation threshold). Στην [41] εφαρμόζεται η τεχνική του isoscaling. Στις [48,51] εξάγεται η τιμή της ενεργείας συμμετρίας μετά από σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις του μοντέλου SMM. Οι μελέτες δείχνουν ότι η ενέργεια συμμετρίας των (διηγευμένων) πυρήνων που παράγονται σε αντιδράσεις πολλαπλής θραύσεως (multifragmentation) είναι μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί στους πυρήνες στη βασική τους κατάσταση. Το αποτέλεσμα αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στην περιγραφή των ιδιοτήτων και της κατανομής παρομοίων πυρήνων που βρίσκονται σε αστροφυσικά περιβάλλοντα, όπως π.χ. σε έκρηξεις supernova ή στην επιφάνεια αστέρων νετρονίων.

I.10. Studies of fission dynamics. Εργασίες [27] και [Γ4].

Στην εργασία [27] παρουσιάζεται συστηματική μελέτη του isoscaling που εμφανίζουν τα προϊόντα σχάσεως των ισοτόπων ^{238}U και ^{233}U κατά τον βομβαρδισμό τους με νετρόνια ενεργείας 14 MeV. Τα δεδομένα ενεργών διατομών ελήφθησαν από βάση δεδομένων της

¹ Η ενέργεια συμμετρίας (ή ακριβέστερα “ασυμμετρίας”) ενός πυρήνα με Z πρωτόνια και N νετρόνια (και συνεπώς με μαζικό αριθμό $A = Z+N$) είναι η επιπλέον ενέργεια που κατέχει αυτός ο πυρήνας ως προς τον αντίστοιχο ισοβαρή πυρήνα με ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων.

βιβλιογραφίας. Η μελέτη έδειξε την δυνατότητα να ληφθούν πληροφορίες για την δυναμική του μηχανισμού σχάσεως με βάση την τεχνική του isoscaling. Ως συνέχεια της ερευνητικής δραστηριότητας στην κατεύθυνση κατανόησης του μηχανισμού της πυρηνικής σχάσεως, έχουμε αρχίσει υπολογισμούς με βάση το μικροσκοπικό μοντέλο CoMD. Η μελέτη αυτή αποτελεί το ερευνητικό αντικείμενο για την διατριβή master της μεταπτυχιακής φοιτήτριας Νικολέττας Βόντα την οποία εκπονεί υπό την επίβλεψή μου (εργασία Γ4).

Κατηγορία Εργασιών II

II.1. Studies of the neutron halo nucleus ^{11}Li . Εργασίες [4,6,9].

Οι εργασίες [4,6] αποτελούν τις πρώτες μετρήσεις κατανομής ορμών των θραυσμάτων (κυρίως του θραύσματος ^9Li) του “εξωτικού” πυρήνα ^{11}Li σε διάφορους στόχους. Η ραδιενεργός δέσμη του ^{11}Li παρήχθει απο αντίδραση θραύσεως βλήματος ^{18}O . Η μελέτη έδειξε ότι το ^{11}Li έχει εκτεταμένη κατανομή νετρονίων σε συμφωνία με θεωρητικούς υπολογισμούς. (Το μέγεθος του πυρήνα ^{11}Li είναι περίπου ίδιο με αυτό του πυρήνα ^{208}Pb .) Οι κατανομές των ορμών και άλλες παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το ^{11}Li αποτελείται απο ένα κεντρικό πυρήνα (core) ^9Li και δύο νετρόνια που περιστρέφονται γύρω απο αυτόν. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει ονομαστεί άλως νετρονίων (neutron halo). Η εργασία [9] εστιάζει στην λεπτομερή φασματοσκοπική μελέτη του πυρήνα ^{11}Li . Το φάσμα νετρονίων που εκπέμπονται μετά απο την β διάσπαση του ^{11}Li μετρήθηκε με μία συστοιχία πλαστικών σπινθηριστών. Το φάσμα παρουσιάζει κορυφές που αντιστοιχούν σε εκπομπή νετρονίων απο γνωστές ενεργειακές στάθμες του θυγατρικού πυρήνα ^{11}Be . Οι λόγοι διακλαδώσεως (branching ratios) των αποδιεγέρσεων μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν με υπολογισμούς του πυρηνικού μοντέλου φλοιών (nuclear shell model). Τα αποτελέσματα είναι επίσης σύμφωνα με την εικόνα της άλω δύο νετρονίων στον πυρήνα ^{11}Li .

II.2. Fusion enhancement with neutron-rich radioactive beams. Εργασίες [7,10,14,43].

Η ομάδα αυτή των εργασιών αποτελεί μία απο τις πρώτες διεθνώς μελέτες αντιδράσεων πυρηνικής συντήξεως με την χρήση ραδιενεργών δεσμών. Οι [7,14] αναφέρονται στη μέτρηση ενεργών διατομών της αντιδράσεως συντήξεως δέσμης πυρήνων ^{38}S (οι οποίες παρήχθησαν απο την θραύση βλημάτων ^{40}Ar) με στόχο ^{181}Ta και σύγκριση με τις αντίστοιχες ενεργές διατομές της αντιδράσεως συντήξεως του σταθερού πυρήνα ^{32}S με τον ίδιο στόχο. Η ενεργός διατομή της πρώτης αντιδράσεως βρέθηκε σημαντικά μεγαλύτερη αυτής της δεύτερης. Το συμπέρασμα αυτό αποδίδεται, κατά κύριον λόγο, στην μείωση του φράγματος δυναμικού Coulomb κατά την αντίδραση του πλουσίου σε νετρόνια πυρήνα ^{38}S σε σύγκριση με το αντίστοιχο της αντιδράσεως με τον σταθερό πυρήνα ^{32}S . Στην εργασία [10] περιγράφεται το ερευνητικό πρόγραμμα μελέτης των αντιδράσεων πυρηνικής συντήξεως με την χρήση ραδιενεργών δεσμών και η σημασία του στην προσπάθεια συνθέσεως βαρέων και υπερβαρέων στοιχείων (superheavy elements) και των ισοτόπων αυτών. Τέλος, η εργασία [43] αποτελεί ένα πρώτο σημαντικό βήμα του παραπάνω ερευνητικού προγράμματος. Στην [43] μελετώνται οι αντιδράσεις συντήξεως των ^{38}S , ^{32}S με στόχο ^{208}Pb και τα συμπεράσματα είναι σύμφωνα με αυτά των [7,10,14].

II.3. Nuclear Astrophysics: cross section measurements relevant to the p-process. Εργασία [15].

Περιγράφονται οι μετρήσεις ενεργών διατομών της αντιδράσεως συλλήψεως πρωτονίου στον πυρήνα ^{93}Nb : $^{93}\text{Nb}(p,\gamma)^{94}\text{Mo}$ στην περιοχή ενεργειών πρωτονίου 1.4 – 4.9 MeV. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο επιταχυντού TANDEM του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” και στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Παν/μίου της Στουτγκάρδης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με θεωρητικούς υπολογισμούς (στατιστικό μοντέλο Hauser-Feshbach). Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην προσπάθεια πειραματικής περιγραφής της αστροφυσικής διεργασίας p (p-process: proton capture process) η οποία είναι υπεύθυνη, μεταξύ άλλων, για την παραγωγή μεσοβαρών πυρήνων πλούσιων σε πρωτόνια.

II.4. Analytical application of Nuclear Physics: channelling studies in crystals. Εργασία [12].

Το άρθρο αυτό αναφέρεται σε αναλυτική εφαρμογή μεθόδων πυρηνικής φυσικής. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην σκέδαση Rutherford πρωτονίων σε γεωμετρία οπισθοσκεδάσεως (Rutherford Back Scattering – RBS). Το άρθρο περιγράφει μια νέα μέθοδο αναλύσεως και προσομοιώσεως των φασμάτων διαυλισμού (channelling) πρωτονίων σε κρυστάλλους πυριτίου σε ενέργειες δέσμης πρωτονίου 1.7 – 2.4 MeV. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο επιταχυντού TANDEM του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ “Δημοκριτος”. Συζητάται η σημασία της μεθόδου στην μελέτη και τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των κρυστάλλων.

II.5. Central heavy-ion collisions as probes of the Nuclear Equation Of State (EOS). Εργασίες [19,23,24] και [32,33,42,47,52,53,59,60]

Στην ομάδα αυτή μελετώνται οι κατανομές ισοτόπων και ενεργειών προϊόντων αντιδράσεων πολλαπλής θραύσεως πυρήνων μετά απο κεντρικές συγκρούσεις βαρέων ιόντων. Χρησιμοποιούνται συστήματα πολλαπλών ανιχνευτών φορτισμένων σωματιδίων και νετρονίων. Οι εργασίες [19,23,24] αναφέρονται στην συστηματική μελέτη των προϊόντων των αντιδράσεων και την εξάρτησή τους απο τον λόγο N/Z των αντιδρώντων συστημάτων. Οι υπόλοιπες εργασίες κυρίως εστιάζονται στη μελέτη της ενεργείας συμμετρίας των παραγομένων (διηγευμένων) πυρήνων και την εξάρτησή της απο την πυκνότητα και την θερμοκρασία. Ιδιαίτερος, στην εργασία [53] συνοψίζονται τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα και τονίζεται η σημασία της ενεργείας συμμετρίας (και της εξαρτήσεώς της απο την πυκνότητα) στη μελέτη της πυρηνικής δομής καθώς επίσης και διαφόρων αστροφυσικών διεργασιών (εκρήξεις supernova και δομή αστέρων νετρονίων). Στην εργασία [59] εξετάζεται η εξάρτηση της μορφής της θερμικής καμπύλης (caloric curve: πυρηνική θερμοκρασία συναρτήσει της ενέργειας διεγέρσεως) απο την φαινόμενη μάζα (effective mass) των νουκλεονίων. Τέλος στην [60] μελετάται η εξάρτηση της ενεργείας συμμετρίας ενός διηγευμένου πυρήνα απο την πυρηνική πυκνότητα και προτείνεται εμπειρική σχέση της εξάρτησης αυτής.

II.6. Studies of quasi-projectile multifragmentation (with the FAUST detector). Εργασίες [26,34,44], [62,64,65,68,80] και [82].

Στις εργασίες [26,34,44] περιγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα των αντιδράσεων πολλαπλής θραύσεως βλήματος (projectile multifragmentation) που ελήφθησαν με τον σωματιδιακό πολυανιχνευτή FAUST στο Texas A&M. Στην [26] γίνεται συστηματική μελέτη του isoscaling. Στην εργασία [34] προτείνεται μέθοδος προσδιορισμού του χρόνου διασπάσεως (decay time) των διηγεμένων πυρήνων που παράγονται στις αντιδράσεις πολλαπλής θραύσεως. Στην εργασία [44] μελετώνται οι ενδείξεις κρίσιμης συμπεριφοράς και αλλαγής φάσεως (nuclear “liquid” to “gas” phase transition) υψηλώς διηγεμένων πυρήνων.

Στην εργασία [62] περιγράφεται η δυνατότητα προσδιορισμού θέσεως σωματιδίων σε ανιχνευτές Si και προτείνεται η αναβάθμιση του πολυανιχνευτή FAUST προς την κατεύθυνση προσδιορισμού θέσεως των θραυσμάτων στους ανιχνευτές του.

Η εργασία [64] αναφέρεται στη μελέτη του isoscaling θραυσμάτων με ατομικό αριθμό $Z=1-8$ που προέρχονται από ανακατασκευασμένα θραύσματα βλήματος (reconstructed quasi-projectiles) με μαζικό αριθμό $A\sim 40$ από αντιδράσεις ^{40}Ar (45MeV/nucleon)+ $^{124,112}\text{Sn}$ και ^{40}Ca (45MeV/nucleon)+ $^{124,112}\text{Sn}$ που μελετήθηκαν με τον ανιχνευτή FAUST. Για πρώτη φορά στη μελέτη του isoscaling προτείνεται ο χαρακτηρισμός του quasi-projectile από την τιμή του N/Z που προκύπτει από την ανακατασκευή του (από τα ανιχνευόμενα θραύσματα). Η μελέτη οδηγεί στην σύνδεση της παραμέτρου του isoscaling (και της ενέργειας συμμετρίας C_{sym}) ως συνάρτηση της ενέργειας διεγέρσεως του ανακατασκευασμένου θραύσματος.

Στην εργασία [65], μελετάται και πάλι το isoscaling θραυσμάτων από ανακατασκευασμένα θραύσματα βλήματος (reconstructed quasi-projectiles) από τις ασύμμετρες αντιδράσεις μερικής συντήξεως $^{40,48}\text{Ca}$ (45MeV/nucleon)+ ^{27}Al που μελετήθηκε με τον FAUST. Συμπεραίνεται ότι κατά το δυναμικό στάδιο της αντιδράσεως λαμβάνει χώρα εκπομπή νετρονίων από τον πολύ πλούσιο σε νετρόνια λαιμό που σχηματίζεται κατά την αλληλεπίδραση του βλήματος με τον στόχο.

Στην εργασία [68] παρουσιάζεται μελέτη της διεργασίας εξισορρόπησης του N/Z (N/Z equilibration) μεταξύ αλληλεπιδρώντων βλήματος -στόχου σε περιφερειακές αντιδράσεις ^{40}Ar (45MeV/nucleon)+ $^{124,112}\text{Sn}$ και ^{40}Ca (45MeV/nucleon)+ $^{124,112}\text{Sn}$ που μελετήθηκαν με τον ανιχνευτή FAUST (ίδια πειραματικά δεδομένα με την εργασία [64]). Το N/Z των θραυσμάτων του βλήματος προσδιορίζεται εκτός από την άμεση ανακατασκευή του quasi-projectile, και με νέα προτεινόμενη μέθοδο που στηρίζεται στο λόγο των ενεργών διατομών παραγωγής ισοβαρών θραυσμάτων.

Η εργασία [80] αναφέρεται στην λεπτομερή μελέτη της πολλαπλής θραύσεως ανακατασκευασμένων βλημάτων με μαζικό αριθμό $A\sim 30$ από την αντίδραση ^{32}S (45MeV/nucleon) + ^{112}Sn που μελετήθηκε με τον ανιχνευτή FAUST. Με τους κώδικες DIT (για το δυναμικό στάδιο της αντιδράσεως) και SMM (για το στάδιο της αποδιέγερσεως), μελετήθηκε η εξάρτηση των κατανομών των παραγομένων θραυσμάτων από την τιμή της ενέργειας συμμετρίας C_{sym} η οποία εμφανίζεται ελαττωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για πυρήνες στη θεμελιώδη τους κατάσταση, σε συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες σε βαρύτερα συστήματα.

Τέλος, στην εργασία [82] εξετάζεται, και πάλι με βάση το μοντέλο SMM, συστηματικώς η εξάρτηση της ενέργειας συμμετρίας C_{sym} από την ενέργεια διεγέρσεως των πρωτογενώς παραγομένων θραυσμάτων βλήματος σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα ανακατασκευασμένων θραυσμάτων στην περιοχή μάζας $A\sim 80$ (δεδομένα από μετρήσεις με τον πολυανιχνευτή NIMROD, βλέπε κατωτέρω).

II.7. Studies of mid-rapidity fragments (with the FIRST detector). Εργασίες [37, 45] και [86].

Στην εργασία [37] περιγράφεται η οργανολογία του πολυανιχνευτή FIRST του Παν/μίου της Indiana που εγκαταστήθηκε στο Texas A&M. Στην εργασία [45] περιγράφονται τα πρώτα αποτελέσματα των πειραμάτων με τον ανιχνευτή FIRST: εκτός από την μελέτη των προϊόντων πολλαπλής θραύσεως βλήματος, κατά την αντίδραση ^{64}Zn (45 MeV/nucleon) + ^{64}Zn , μελετήθηκε λεπτομερώς ο λόγος του αριθμού N_n των νετρονίων ως προς τον αριθμό N_p των πρωτονίων που εκπέμπονται από την ενδιάμεση περιοχή αλληλεπιδράσεως μεταξύ του βλήματος και του στόχου ("neck" region). Αυτή η περιοχή έχει πυκνότητα νουκλεονίων μικρότερη από την μέση πυρηνική πυκνότητα ($\rho_0=0.17$ nucleons/fm³). Ο λόγος N_n / N_p βρέθηκε μεγαλύτερος από το λόγο N/Z του αντιδρώντος συστήματος και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ενδιάμεση περιοχή εμπλουτίζεται σε νετρόνια. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνει την εξάρτηση της ενεργείας συμμετρίας από την πυκνότητα (εξάρτηση, που όπως σημειώθηκε ανωτέρω, έχει ιδιαίτερη σημασία στην αστροφυσική των supernova και των αστέρων νετρονίων). Τέλος, η εργασία [86] αναφέρεται στη μελέτη της χρονικής εξάρτησης της εξισορροπήσεως του βαθμού ελευθερίας N/Z μεταξύ βλήματος και στόχου.

II.8. Nuclear thermodynamics studies of heavy-ion collisions with the NIMROD neutron and particle detector array (the NIMROD collaboration). Εργασίες [28,29,35,36,38,39,50] και [63,84].

Οι πειραματικές μετρήσεις αυτής της σειράς εργασιών ελήφθησαν με τον πολυανιχνευτή νετρονίων και φορτισμένων σωματιδίων NIMROD του Texas A&M. Στην [29] δίνεται η συστηματική μελέτη των χαρακτηριστικών των αντιδράσεων multifragmentation στην περιοχή της ενεργείας Fermi (~35 MeV/nucleon) και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις του μικροσκοπικού μοντέλου AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics). Οι εργασίες [28,35,36] μελετούν τις ενδείξεις κρίσιμης συμπεριφοράς και αλλαγής φάσεως σε διηγεμένους πυρήνες στην περιοχή μαζών $A\sim 36$. Η [38] εξετάζει την αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας κατά τις αντιδράσεις multifragmentation στην περιοχή ενεργείας Fermi, ενώ η [39] μελετά τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο της αντιδράσεως. Τέλος, η [50] εξετάζει τις ιδιότητες της περιοχής αλληλεπιδράσεως (περιοχή λαιμού) μεταξύ του βλήματος και του στόχου.

Στην εργασία [63] παρουσιάζεται λεπτομερής μελέτη του isoscaling ανακατασκευασμένων θραυσμάτων στην περιοχή μάζας $A\sim 80$ εφαρμόζοντας την μέθοδο που προτείνεται στην εργασία [64] (βλέπε ανωτέρω). Τέλος, στην [84] αναφέρεται ο πειραματικός προσδιορισμός του αριθμού νετρονίων που εκπέμπονται κατά τις περιφερειακές και ημιπεριφερειακές αντιδράσεις βαρέων ιόντων. Ο προσδιορισμός αυτός συμβάλλει στον ακριβή προσδιορισμό των Z και A των ανακατασκευασμένων θραυσμάτων βλήματος που έχει ιδιαίτερη σημασία στις λεπτομερείς μελέτες των ιδιοτήτων των quasi-projectiles.

II.9. Nuclear temperature determination from momentum fluctuations. Εργασίες [69,81,85] και εργασία [Γ3].

Στην εργασία [69] αναπτύσσεται νέα μέθοδος προσδιορισμού της θερμοκρασίας διεγερμένων (ανακατασκευασμένων) θραυσμάτων βλήματος που παράγονται σε περιφερειακές και ημιπεριφερειακές αντιδράσεις στην περιοχή της ενέργειας Fermi. Η

μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό της διακύμανσης της ορμής ανακατασκευασμένων θραυσμάτων που μπορεί να εξαχθεί από τις μετρήσεις των ανιχνευομένων θραυσμάτων (π.χ. πρωτονίων). Στην παρούσα κλασική θεώρηση, η κατανομή των ορμών θεωρείται Maxwellian. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στην εργασία [81] σε ανακατασκευασμένα θραύσματα βλήματος με διαφορετικό N/Z και παρατηρείται σαφής εξάρτηση της προσδιοριζόμενης θερμοκρασίας από την ασυμμετρία νετρονίων/πρωτονίων (δηλαδή του λόγου N/Z) του quasi-projectile.

Στην εργασία [85], η οποία αποτελεί συνέχεια της [81], προσδιορίζεται η θερμοκρασία με τη χρήση διαφορετικών σωματιδίων (εκτός από p , επίσης d , t , ${}^3\text{He}$, α) και εξετάζεται η εξάρτηση της λαμβανόμενης θερμοκρασίας από το N/Z του quasi-projectile. Τέλος, η εργασία [Γ3] αναφέρεται στον προσδιορισμό της θερμοκρασίας με την μέθοδο της διακύμανσης της ορμής, αλλά θεωρώντας κατανομή Fermi-Dirac (και όχι Maxwellian) για τα θεωρούμενα θραύσματα (εν προκειμένω πρωτόνια).

II.10. Studies of the nuclear liquid-gas phase transition within the Landau free-energy approach. Εργασίες [72,75,76,83].

Η ομάδα αυτή των εργασιών αναφέρεται στη λεπτομερή μελέτη μεταπτώσεως φάσεως (υγρό-αέριο) διεγερμένων πυρήνων με εφαρμογή της μεθόδου ελεύθερης ενέργειας κατά Landau. Από τα πειραματικά δεδομένα κατανομών θραυσμάτων (ανακατασκευασμένων) βλημάτων εξάγονται οι τιμές των σταθερών της εκφράσεως Landau του λόγου F/T ελεύθερης ενέργειας προς θερμοκρασία. Μελετάται η εξάρτηση των παραμέτρων αυτών από την ενέργεια διεγέρσεως και από την ασυμμετρία νετρονίων/πρωτονίων που εκφράζεται με την ποσοτήτα $m_s = (N-Z)/A$.

II.11. Studies of transverse collective flow and sensitivity to the nuclear equation of state. Εργασίες [70,71,77,79].

Η ομάδα αυτή των εργασιών αναφέρεται στην πειραματική μελέτη των κατανομών ορμών θραυσμάτων που προέρχονται από κεντρικές συγκρούσεις κατά τις αντιδράσεις ${}^{70}\text{Zn}$ (35 MeV/nucleon)+ ${}^{70}\text{Zn}$, ${}^{64}\text{Zn}$ (35 MeV/nucleon)+ ${}^{64}\text{Zn}$ και ${}^{64}\text{Ni}$ (35 MeV/nucleon) + ${}^{64}\text{Ni}$ που μελετήθηκαν με τον ανιχνευτή NIMROD. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με προβλέψεις από τα θεωρητικά μοντέλα CoMD (Constrained Molecular Dynamics), AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics) και SMF (Stochastic Mean Field). Μελετάται η ευαισθησία των υπολογισμών ως προς την χρησιμοποιούμενη καταστατική εξίσωση (δηλαδή, ισοδύναμα, ως προς την υιοθετούμενη αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου) και ιδιαιτέρως ως προς την εξάρτηση της ενέργειας συμμετρίας από την πυκνότητα.

II.12. Microsecond isomer production in 80 MeV/nucleon ${}^{238}\text{U}$ fission. Εργασία [61].

Παρουσιάζεται η παραγωγή και η μελέτη ισομερών καταστάσεων σπανίων πυρήνων πλούσιων σε νετρόνια που παράγονται κατά την σχάση βλήματος ${}^{238}\text{U}$ (80 MeV/nucleon) κατόπιν αντιδράσεως με στόχο ${}^9\text{Be}$. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο NSCL του πολιτειακού πανεπιστημίου του Michigan. Ο διαχωρισμός και η ταυτοποίηση των ισοτόπων έγινε με τον φασματογράφο μάζας A1900 και η μελέτη της αποδιέγερσης των ισομερών καταστάσεων με ανιχνευτή Ge υψηλής καθαρότητας (HPGe). Η εργασία αυτή έδειξε τη δυνατότητα παραγωγής και μελέτης της δομής μεσοβαρών πυρήνων πλούσιων σε

νετρόνια που μπορούν να παραχθούν από τη σχάση ^{238}U σε μετρίως υψηλές ενέργειες. Σημειώνουμε ότι παρόμοια μελέτη μπορεί να πραγματοποιηθεί και με δέσμη ^{238}U σε χαμηλές ενέργειες (βλέπε [8]) και αποτελεί πιθανή δραστηριότητά μας στο μέλλον στα πλαίσια αντίστοιχης συνεργασίας.

II.13. Coherent neutrino-nucleus scattering as a probe of supernova neutrinos.

Εργασία [78]

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμών σκεδάσεως ουδέτερου ρεύματος νετρίνων (neutral-current scattering) σε σειρά πυρήνων από He έως Pb. Το ενεργειακό φάσμα των προσπιπτόντων νετρίνων προσομοιάζεται με κατανομή Fermi-Dirac. Η μελέτη έδειξε ότι βέλτιστη απόκριση του ανιχνευτή νετρίνων παρέχεται από τον κατάλληλο συνδυασμό μεταξύ ενεργού διατομής σκεδάσεως (που ευνοείται από υλικό μεγάλου Z) και ενέργειας ανάκρουσης του σκεδαζόμενου πυρήνα (που ευνοεί στόχο μικρού Z). Προτείνεται, μεταξύ άλλων δυνατοτήτων και γεωμετριών, ο σχεδιασμός σφαιρικού ανιχνευτού τύπου TPC (Time Projection Chamber) που να στηρίζεται στη χρήση αερίου ^{40}Ar ή ^{132}Xe . Σημειώνεται ότι το ενδιαφέρον και η δραστηριότητα προς την κατεύθυνση ανίχνευσης νετρίνων από αστροφυσικά φαινόμενα (κυρίως από εκρήξεις supernova) αποτελεί σήμερα μιά από τις πιο σημαντικές ερευνητικές κατευθύνσεις στα όρια της Πυρηνικής Φυσικής και Αστροφυσικής.