

ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ 2004

Εισαγωγή

Κ. Ν. Παπανικόλας
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Περίληψη

Η ενότητα που ακολουθεί παραθέτει κάποια εισαγωγικά σχόλια περί τα της πυρηνικής επιστήμης. Σχολιάζονται τα πυρηνικά φαινόμενα και συστήματα, το αντικείμενο μελέτης της επιστήμης παρουσιάζονται στην σύγχρονη τους θεώρηση. Παρουσιάζεται ο τρόπος ανάπτυξης του θέματος, που αφετηρία έχει το καθιερωμένο πρότυπο και την κβαντική θεωρία πολλών σωμάτων.

Η Πυρηνική Επιστήμη

Η πυρηνική επιστήμη επιζητά να δώσει μια θεμελιειακή κατανόηση της ισχυρά αλληλοεπιδρούσας ύλης, των αλληλεπιδράσεων που την κυβερνούν, την θερμοδυναμική της συμπεριφορά, την δομή και δυναμική συμπεριφορά των πυρηνικών συστημάτων.

Ελπίζουμε ότι με την βοήθεια της πυρηνικής φυσικής θα αποκομίσουμε την κατανόηση του σύμπαντος και του κόσμου γύρω μας, την κατανόηση της προέλευσης και δομής της αδρονικής ύλης. Τέλος, ο έλεγχος και η αξιοποίηση της γνώσης αυτής ήδη αποδίδουν σε πληθώρα εφαρμογών (πυρηνική ιατρική, ενέργεια, κλπ).

Ιστορική Αναδρομή

Πρίν απο ένα αιώνα σε μια ραγδαία επιστημονική επανάσταση τρεις σημαντικές ανακαλύψεις έδωσαν γένεση στην σύγχρονη φυσική του μικροκόσμου.

1895	<i>W.Röntgen</i>	Ανακάλυψη των ακτίνων X	
1897	<i>J.J.Thompson</i>	Καθοδικές ακτίνες (ηλεκτρόνια)	(1)
1896	<i>H.Bequerel</i>	Φυσική Ραδιενέργεια	

Η ραγδαία εξέλιξη που ακολούθησε οδήγησε στην πραγματικά εντυπωσιακή ανακάλυψη του Rutherford: ότι η μάζα του ατόμου είναι συγκεντρωμένη στο πυρήνα του. Το πραγματικά αναπάντεχο ήταν η διαπίστωση ότι η ακτίνα του πυρήνα ήταν της τάξης $10^{-15}m$ (σε σύγκριση με αυτή του ατόμου $10^{-10}m$). Αυτό συνεπάγεται πυκνότητα $(10^{-10}/10^{-15})^3 = 10^{15}$ πιο πυκνή από αυτή του επισθητού μας κόσμου! Ένα εκατομμύριο δισεκατομμύρια φορές πιο πυκνή από την συνηθισμένη, για το ανθρώπινο είδος, ύλη!

Η επαναστατική (σ' αλήθεια ακατανόητη τότε) παρατήρηση αυτής της εξωτικής μορφής ύλης - της πυρηνικής ύλης - ήταν πέρα από την ικανότητα της τότε φυσικής να την περιγράψει, πολύ δε περισσότερο να την ερμηνεύσει και να προβλέψει την συμπεριφορά της. Χρειάστηκε η ανακάλυψη και εμπέδωση της κβαντομηχανικής κύρια με την μελέτη των ατομικών φαινομένων για να αποκτήσουμε το αναγκαίο δυναμικό πλαίσιο ερμηνείας των πυρηνικών φαινομένων.

Χρειάστηκε έντονη πειραματική δραστηριότητα συμπεριλαμβανομένης και της εφεύρεσης διατάξεων που να παράγουν συνθήκες ενεργειακά απομακρυσμένες από τον γήινο κόσμο μας (με επιταχυντές) για να συσσωρευτεί το αναγκαίο σώμα εμπειρικών παρατηρήσεων που να μας επιτρέψει την θεωρητική κατανόησή της.

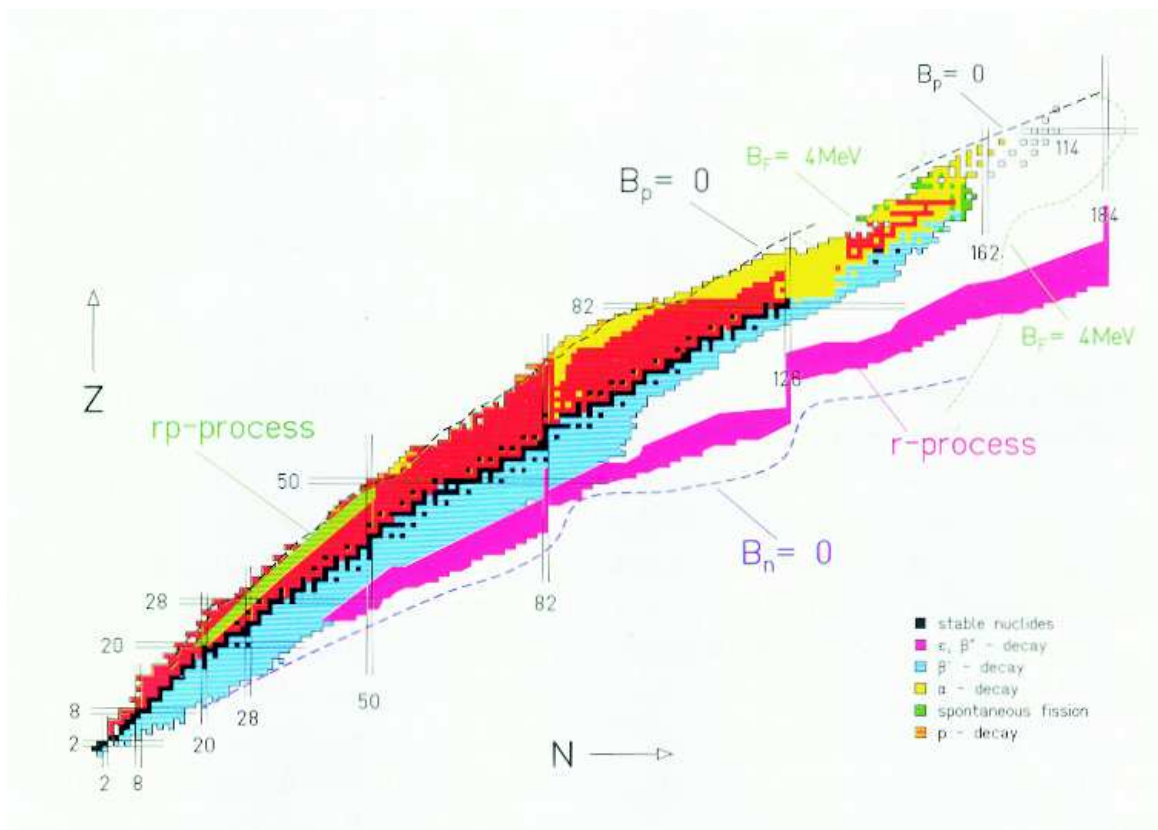
Η ανακάλυψη του νετρονίου το 1932 οδηγεί στην κατανόηση ότι οι πυρήνες αποτελούνται από δύο κυρίαρχα συστατικά τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Προκύπτει μια ιδιαίτερα οικονομική περιγραφή όλου του περιοδικού πίνακα: μπορούμε να καταγράψουμε όλο τα γνωστά στο σύμπαν ισότοπα με μόνο δύο αριθμούς (Z, N)($A = Z + N$), όπου Z , A και N είναι ο ατομικός, μαζικός αριθμός και ο αριθμός νετρονίων του ισότοπου. Η ταξινόμηση αυτή οδηγεί στον πίνακα νουκλιδίων (ή Segre) (Βλέπε σχολιασμό και Σχήμα 46 στο Εισαγωγικό Βιβλίο των Cottinham και Greenwood [1]). Στο Σχήμα 1 δίνεται μιά σύγχρονη εκδοχή του χάρτη νουκλιδίων.

Μια άλλη συνταρακτική ανακάλυψη / επιβεβαίωση ήταν αυτή της λειτουργίας του ήλιου (Bethe H). Ο ήλιος δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα τεράστιο πυρηνικό καμίνι! Όπως βέβαια και όλα τα άλλα άστρα στο ορατό σύμπαν. Η απομυθοποίηση (κατανόηση) των ενεργειακών πηγών του πλανητικού μας συστήματος αλλά και του μέχρι τώρα γνωστού σύμπαντος μπορεί μόνο να συγκριθεί με τον θρίαμβο του Laplace όταν ανακάλυψε ότι η ουράνια δυναμική δεν ήταν τίποτα άλλο παρά Νευτώνεια Μηχανική εφαρμοσμένη σε ουράνια σώματα.

Τέλος, η ερμηνεία της πυρηνογένεσης σε αστρικά συστήματα (υπερκαινοφαιών (Supernova) κλπ) όπως και στο πρώιμο σύμπαν (Big Bang) μας πείθουν ότι η πυρηνική φυσική αποτελεί το κλειδί για την κατανόηση της γένεσης και μορφολογίας του κόσμου μας.

Πυρηνικά Συστήματα και Πυρηνικά Φαινόμενα

Είναι σχεδόν ταυτολογία να πούμε ότι η πυρηνική επιστήμη μελετά πυρηνικά φαινόμενα και αποπειράται να ερμηνεύσει την συμπεριφορά των πυρηνικών συστημάτων. Μια τέτοια δήλωση αποκτά περιεχόμενο μόνο όταν καθορίσουμε και περιγράψουμε τα πυρηνικά φαινόμενα και συστήματα.



Σχ. 1: Ο χάρτης Νουκλιδίων, ή χάρτης Segre, στον οποίο χαρτογραφούνται ιδιαίτερα οικονομικά όλοι οι ατομικοί πυρήνες.

Οι εφαρμογές της πυρηνικής επιστήμης είναι ευρύτατα διαδεδομένες στις σημερινές τεχνολογικές κοινωνίες, όπως η Ελλάδα. Ο μέσος πολίτης τις αξιοποιεί καθημερινά: Πυρηνική Ενέργεια (ηλεκτρισμός) Πυρηνική Ιατρική (σπινθηρογραφήματα, μαγνητική τομογραφία κ.α.), Αρχαιομετρία, Συντήρηση Τροφίμων, Βιολογία κλπ. Δυστυχώς, όπως σε κάθε τομέα επιστήμης, η γνώση μπορεί πάντοτε να αξιοποιηθεί καταστροφικά. Στην πυρηνική επιστήμη, αυτό αναδείχθηκε με τον πιο δραματικό τρόπο, με την ανάπτυξη των πυρηνικών όπλων.

Η πυρηνική επιστήμη διεξάγεται σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα των τεχνολογικά ανεπτυγμένων χωρών. Οι πειραματικές εγκαταστάσεις είναι συνήθως μεσαίας ή μεγάλης κλίμακας (Επιταχυντές, αντιδραστήρες, Πηγές Ακτινοβολήσης, υπερυπολογιστές).

Πυρηνικά Συστήματα

Τα πυρηνικά συστήματα τα συναντάμε παντού. Η ύλη η οποία μας περιτριγυρίζει, ή ύλη απο την οποία είμαστε φτιαγμένοι αποτελείται κύρια απο ατομικούς πυρήνες. Με την μελέτη των ατομικών πυρήνων γεννήθηκε η πυρηνική φυσική. Σήμερα όμως, με την διευρυμένη της έννοια σαν η επιστήμη που μελετά την ισχυρά αλληλοεπιδρούσα ύλη μπορούμε να αναφέρουμε ότι περιλαμβάνει και τα ακόλουθα συστήματα:

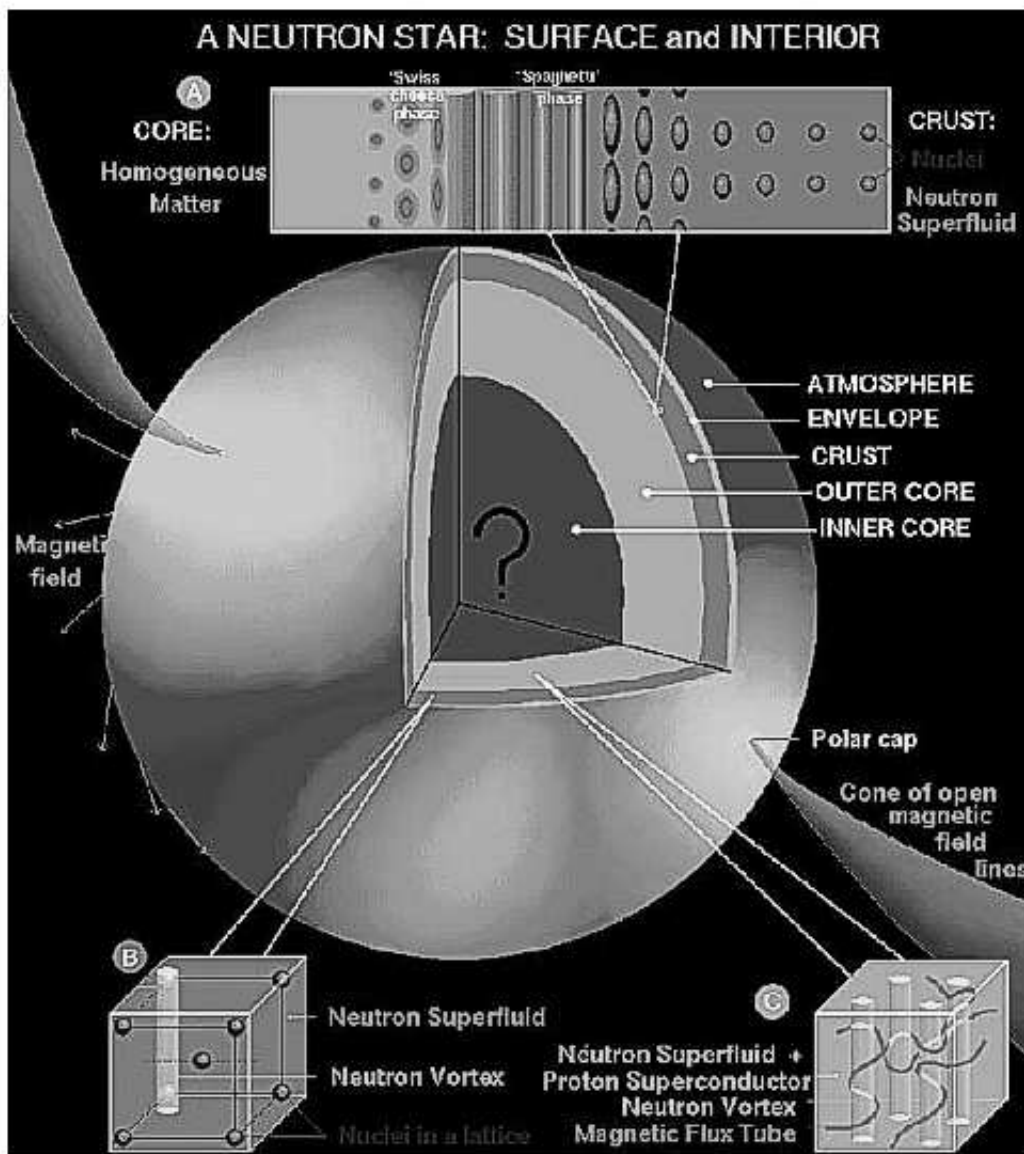
- Τους ατομικούς πυρήνες
- Τα αδρόνια (Νουκλέονια και Μεσόνια)
- Ουράνια σώματα (λ.χ. αστέρες νετρονίων)
- Το σύμπαν στα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την γένεση του.

Να επισημάνουμε ότι πυρηνικά συστήματα δέν συναντώνται μόνο στον μικρόκοσμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μακροσκοπικού συστήματος πυρηνικής ύλης που αποτελεί αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας είναι οι αστέρες νετρονίων. Ουράνια σώματα με μάζα περίπου $1.4(M_{\odot})$ αλλά με διάμετρο μόνο μερικών χιλιομέτρων, συναντώνται διασπαρτα τόσο στον δικό μας ή και σε άλλους γαλαξίες. Στο Σχήμα 2 δίνονται σχηματικά ορισμένες ιδιότητες αυτού του εξαιρετικού ενδιαφέροντος και αντικείμενου έντονης ερευνητικής δραστηριότητας πυρηνικού συστήματος. Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε ότι η ύλη που τους συνθέτει έχει πυκνότητα χαρακτηριστική της πυρηνικής ύλης.

Πυρηνικά Φαινόμενα

Το ορατό σύμπαν, κυριαρχείται από πυρηνικά φαινόμενα. Τα παρατηρήσιμα φαινόμενα, όπως το φώς απο τον ήλιο μας, όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που παρατηρούμε απο μακρινούς αστέρες και γαλαξίες, οι εκρήξεις υπερκαινοφανών είναι όλα προϊόντα πυρηνικών διεργασιών.

Γνωρίζουμε σήμερα ότι το μεγαλύτερο μέρος της ύλης δέν είναι άμεσα παρατηρήσιμο (‘‘σκοτεινή ύλη’’) - για κάποιο άγνωστο για την ώρα λόγο δεν συμμετέχει σε πυρηνικές διαδικασίες. Είναι πάντως αξιοσημείωτο ότι μια απο τις λίγες εξαιρετικά πειστικές μαρτυρίες που έχουμε για την ύπαρξη



Σχ. 2: Σε αστέρες νετρονίων, πυρηνικά συστήματα μακροσκοπικών διαστάσεων, παρατηρούνται φαινόμενα εξαιρετικού ενδιαφέροντος, όπως υπερευστότητα, πυρηνική ύλη σε κρυσταλλική μορφή κλπ..

''σκοτεινής ύλης'' προέρχεται από την στοιχειομετρία των ισοτοπών της κοσμολογικής πυρηνογένεσης και την θεωρητική κατανόηση της, ένα από τα πολλά ενδιαφέροντα μέτωπα της πυρηνικής επιστήμης.

Το καθιερωμένο πρότυπο

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η Κβαντική Χρωμοδυναμική (ΚΧΔ) είναι η θεωρία που περιγράφει την ισχυρά αλληλεπιδρούσα ύλη. Η Κβαντική Χρωμοδυναμική περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ κουάρκ και γκλουονίων. Τα πυρηνικά δυναμικά (λ.χ. Παρισίου) που περιγράφουν την αλληλεπίδραση

ανάμεσα στα αδρόνια, θα προκύψουν σαν απομεινάρι της ΚΧΔ σε μεγάλες αποστάσεις (όπως το δυναμικό Lennard - Jones εμφανίζεται στην μοριακή φυσική, απομεινάρι της δύναμης Coulomb).

Πρέπει να τονίσουμε ότι οι λύσεις της ΚΧΔ στην περιοχή της δέσμησης δεν μοιάζουν καθόλου με αυτές της ιδιαίτερα απλής μορφής που έχουν στο όριο (περιοχή) των υψηλών ενεργειών. Αιτία: Η αλληλεπίδραση γίνεται όλο και πιο ισχυρή όσο η ορμή (ενέργεια) των συστατικών γίνεται μικρότερη με αποτέλεσμα στις χαμηλές ενέργειες που χαρακτηρίζουν το σύμπαν σήμερα η αλληλεπίδραση να είναι τόσο ισχυρή ώστε να μην μπορούν να εφαρμοστούν οι μέθοδοι λύσης που χρησιμοποιούνται στο όριο των υψηλών ενεργειών. Πέρα από την μεθοδολογική αυτή δυσκολία η μεταβολή του σθένους της αλληλεπίδρασης οδηγεί στην αλλαγή φάσης της πυρηνικής ύλης, παρεμβάλλονται μάλιστα δύο αλλαγές φάσεις (περίπου στα 200 MeV), της δέσμησης και χειραλικής συμμετρίας. Στις αλλαγές φάσης έχουμε:

- Η Δέσμηση: τα κουάρκ γίνονται δέσμια και ο βαθμός ελευθερίας του χρώματος "παγώνει"
- Η χειραλική συμμετρία: η συμμετρία χειρός παύει να είναι κάλη και τα δεξιόχειρα συστήματα να έχουν όμοια συμπεριφορά με τα αριστερόστροφα.

Η επίτευξη και κατανόηση των λύσεων της χρωμοδυναμικής στο όριο των χαμηλών ενεργειών είναι εξαιρετικά δύσκολη και αποτελεί μία από τις μεγάλες προκλήσεις του αιώνα μας! Μπορούμε να αναμένουμε μεγάλες εκπλήξεις (λ.χ. ο πρόσφατος ισχυρισμός ότι ανακαλύφθηκαν νέα συστήματα δέσμιων κουάρκ τα Pentaquarks).

Θεμελιακοί και Ενεργοί βαθμοί ελευθερίας

Ένα από τα καίρια ερωτήματα της σύγχρονης Πυρηνικής Φυσικής, είναι ο εντοπισμός των κατάλληλων βαθμών ελευθερίας για την περιγραφή των πυρηνικών φαινομένων που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Σήμερα η κατάσταση αυτή βρίσκεται στο ακόλουθο σημείο:

α) Πιστεύουμε ότι ξέρουμε τους «θεμελιακούς» βαθμούς ελευθερίας (συστατικά και αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους) οι οποίοι είναι αυτοί του «καθιερωμένου πρότυπου».

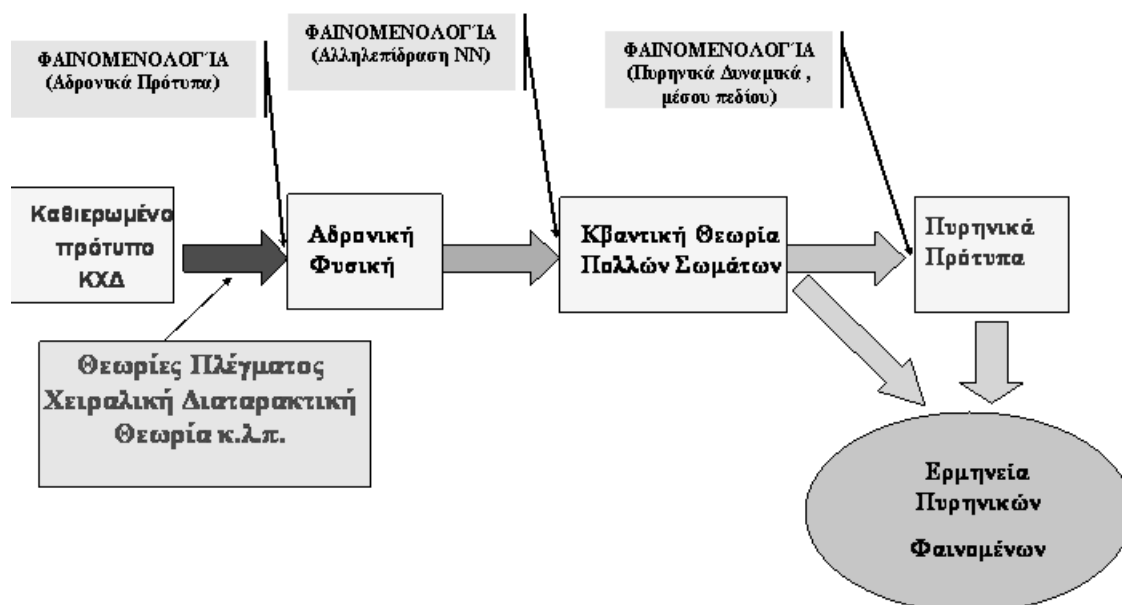
β) Έχουμε επιμέρους, πετυχημένες περιγραφές (φαινομενολογικές) των περισσοτέρων φαινομένων, σε ένα μη σχετικιστικό, δυναμικό πλαίσιο με όρους αδρονίων (μεσονίων + νουκλεονίων) και την χρήση δυναμικών με την χρήση «ενεργών» βαθμών ελευθερίας.

γ) Δεν έχουμε ποσοτική, μόνο επιμέρους ποιοτική, περιγραφή (κατανόηση) της μετάβασης από τους «θεμελιακούς» στους «ενεργούς (effective)» βαθμούς ελευθερίας.

Ο Οδικός Χάρτης

Σε μια ενότητα της επιστήμης που χαρακτηρίζεται απο πληθώρα φαινομένων σε εντελώς διαφορετικές κλίμακες, όπου η θεωρία που τα περιγράφει είναι περίπλοκη και σε πολλούς τομείς ακόμη σε

Πυρηνική Θεωρία



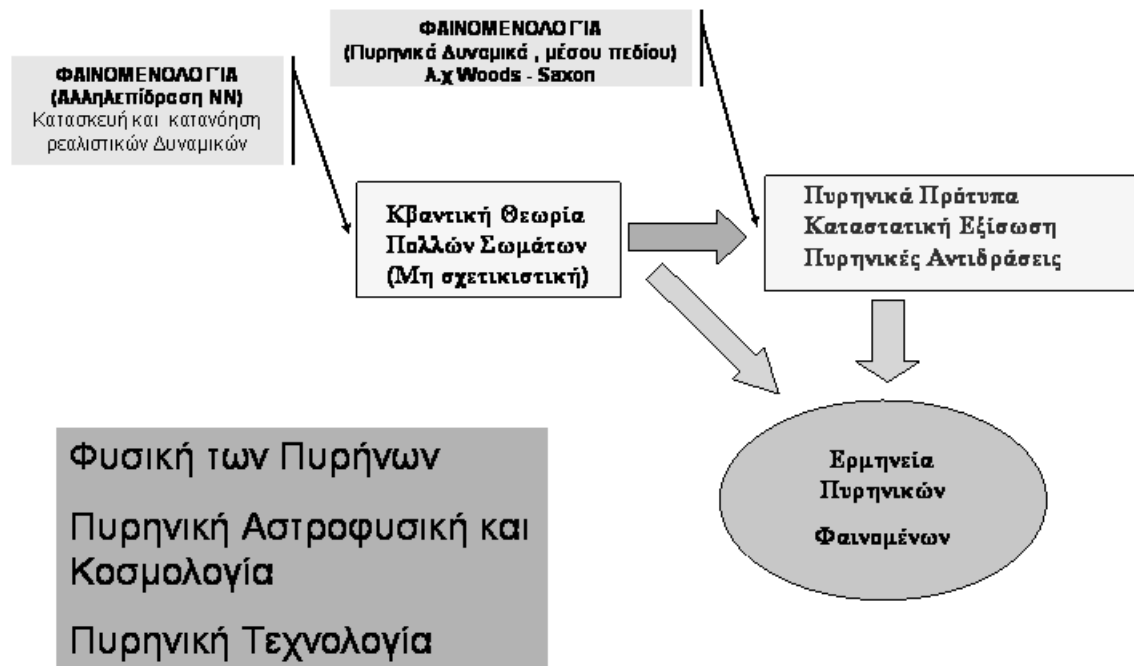
Σχ. 3: Η πυρηνική επιστήμη με αφετηρία το καθιερωμένο πρότυπο και δυναμικό πλαίσιο την κβαντική θεωρία πολλών σωμάτων οδηγεί στην εξήγηση των πυρηνικών φαινομένων και συστημάτων.

εξέλιξη είναι εύκολο κανείς να χάσει την συνέχεια και την ενότητα του θέματος. Οι εξειδικεύσεις και οι προσεγγίσεις που πολλές φορές είναι αναγκαίες για την περιγραφή σειράς φαινομένων δεν απλουστεύουν την κατάσταση. Στην ενότητα αυτή δίνουμε μια συνοπτική εικόνα των εννοιών όπως θα τα αναπτύξουμε και των οποίων η λογική αλληλουχία ελπίζουμε να είναι προφανής. Με κάποια έννοια, δίνουμε ένα 'όδικό χάρτη' 'του πώς κανείς μπορεί να προσεγγίσει και να κατανοήσει την πυρηνική φυσική ή τουλάχιστον πώς σκοπεύουμε να αναπτύξουμε την ύλη στο μάθημα αυτό.

Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 δείχνει ότι με αφετηρία το καθιερωμένο πρότυπο και την κβαντική χρωμοδυναμική και με σειρά καλά προσδιορισμένων βημάτων μπορούμε να οδηγηθούμε στην ερμηνεία όλων των πυρηνικών φαινομένων. Ο 'χάρτης' που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4, υποσύνολο του πρώτου, δείχνει τις αντίστοιχες αλληλουχίες στο θεματικό περιεχόμενο της 'κλασικής πυρηνικής φυσικής'. Και στα δύο σχήματα γίνεται προσπάθεια να αναδειχθεί η σημασία της εισαγωγής της κατάλληλης μεθοδολογίας, προσεγγίσεων και φαινομενολογίας όπου υπολογιστικές αδυναμίες ή δυσκολίες το καθιστούν αναγκαίο. Για παράδειγμα η αδυναμία να υπολογίσουμε την αλληλεπίδραση νουκλεονίων από την ΚΧΔ μας οδηγεί στην εισαγωγή των φαινομενολογικών ρεαλιστικών δυναμικών.

Ο σύγχρονος αυτός 'πίνακας του Mendeleev' με τα φερμιόνια και τα μποζόνια του καθιερωμένου προτύπου αποτελούν την αφετηρία. Με αυτά συνθέτουμε τα αδρόνια τις δέσμεις και άχρωμες

Κλασική Πυρηνική Θεωρία



Σχ. 4: Στην Κλασική Πυρηνική Θεωρία σε δυναμικό πλαίσιο όπου συστατικά είναι τα νουκλεόνια τα οποία αλληλεπιδρούν με φαινομενολογικά προσδιοριζόμενα δυναμικά, εξηγούνται με εντυπωσιακή ακρίβεια σχεδόν όλα τα γνωστά πυρηνικά φαινόμενα.

οντότητες που κυριαρχούν στο σημερινό σύμπαν. Η αλληλεπίδραση των αδρόνιων μπορεί να περιγραφεί με επιτυχία με βάση κάποια περίπλοκα δυναμικά, καθότι η σχετικότητα (ή τουλάχιστον η δυναμική σχετικότητα) έχει συνήθως μικρή σημασία.

Χαρακτηριστικά μεγέθη και Μονάδες

Κάθε φυσικό σύστημα χαρακτηρίζεται από τα χαρακτηριστικά του μεγέθη, τις χαρακτηριστικές του μονάδες - κλίμακα. Με αυτά τα μεγέθη και μονάδες το πρόβλημα γίνεται πιο κατανοητό και εύκολα μπορούμε να έχουμε κάποια αίσθηση του τί είναι μεγάλο και τι είναι μικρό. Για παράδειγμα στις καθημερινές μας χρήσεις, έχουμε επιλέξει σαν χαρακτηριστικό μέγεθος μήκους το μέτρο (m) λόγω των διαστάσεων του ανθρώπινου σώματος, σαν χαρακτηριστικό χρόνο το δευτερόλεπτο (s) την διάρκεια του ανθρώπινου παλμού κ.ο.κ. Αναμένουμε βέβαια ότι οι ανθρωποκεντρικές μονάδες του SI συστήματος, δεν θα είναι οι κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν σε πυρηνικά συστήματα.

Χαρακτηριστική Μάζα

Εξαιρετικά δύσκολο και άλυτο θεμελιωτικό (μέχρι σήμερα) πρόβλημα. Στην πυρηνική φυσική η κλίμακα δίνεται πρωταρχικά από την μάζα των νουκλεονίων ($m_p = 938 \text{ MeV}$) και κατά δεύτερο λόγο από την μάζα του ελαφρότερου μποζονίου, του πιονίου ($m_\pi = 138 \text{ MeV}$), του μποζονίου του οποίου η ανταλλαγή καθορίζει την συμπεριφορά των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων σε μεγάλες αποστάσεις.

Χαρακτηριστικό Μήκος

Εξαιρετικά δύσκολο και άλυτο θεμελιωτικό (μέχρι σήμερα) πρόβλημα. Σε θεμελιωτικό επίπεδο αυτό σχετίζεται με το άλυτο πρόβλημα της δέσμησης. Σχετίζεται επίσης με το μήκος κύματος λ^c Compton wavelength του μποζονίου που διαδίδει την πυρηνική δύναμη, του πιονίου.

$$\lambda_\pi^c = \frac{\hbar}{m_\pi c} = 1.4 \text{ fm}$$

Χαρακτηριστικό μήκος είναι βέβαια αυτό της ακτίνας (διαμέτρου) του πρωτονίου. Είναι γνωστό από πειραματικές μετρήσεις ότι η ακτίνα (διαμέτρος) του $r_p = 0.7 \text{ fm}$, $d_p = 1.4 \text{ fm}$. Το ότι οι δύο αυτές εκτιμήσεις του χαρακτηριστικού μήκους συμπίπτουν, δεν είναι βέβαια τυχαίο.

Χαρακτηριστική Πυκνότητα

Έχοντας τις τιμές για την χαρακτηριστική μάζα και για το χαρακτηριστικό μήκος, μπορούμε πολύ εύκολα να βρούμε την τιμή για την χαρακτηριστική πυκνότητα. Όπως σχολίασαμε πιο πάνω, αυτό συνεπάγεται πυκνότητα $(10^{-10}/10^{-15})^3 = 10^{15}$ πιο πυκνή από αυτή του επισθητού μας κόσμου, που όμως σε κοσμική κλίμακα, αποτελεί την εξαίρεση και όχι τον κανόνα.

Χαρακτηριστικός Χρόνος

Όριο Αιτιότητας (Causal Time): Ο χρόνος που απαιτείται για να διασχίσει πυρήνα κάποιο φωτόνιο. Ο μικρότερος πυρήνας είναι αυτός του υδρογόνου (το πρωτόνιο) με διάμετρο $d_p = 1.5 \text{ fm}$ και αυτή των βαρειών πυρήνων $d_A \leq 15.0 \text{ fm}$. Είναι έτσι εύκολο να βρούμε ότι για ατομικούς πυρήνες έχουμε

$$5 \cdot 10^{-24} \text{ s} \leq t_{\text{causal}} \leq 5 \cdot 10^{-23} \text{ s}$$

Σύμφωνα με την θεωρία της σχετικότητας χρόνοι μικρότεροι από τον t_{causal} δεν έχουν φυσικό νόημα.

Ο χαρακτηριστικός χρόνος στα φυσικά συστήματα δίνεται συνήθως από την περίοδο περιοδικών φαινομένων που τα χαρακτηρίζουν. Για παράδειγμα στην πλανητική φυσική δίνεται από την περίοδο περιστροφής των πλανητών γύρω από τον ήλιο (για την γή το ημερολογιακό έτος) ή σε βιολογικά συστήματα από την περίοδο των παλμών της καρδιάς (στον άνθρωπο περίπου 1s). Στους πυρήνες χαρακτηριστικό χρόνο θα αναζητήσουμε στην περίοδο κάποιας «τυπικής» πυρηνικής ταλάντωσης [λ.χ. του γιγαντιαίου διπολικού συντονισμού (Giant Dipole Resonance περίπου $E = 12 \text{ MeV}$ σε βαρείους πυρήνες, η τις πρώτες συλλογικές τετραπολικές ταλαντώσεις περίπου $E = 2 \text{ MeV}$). Είναι εύκολο

να υπολογίσουμε ότι αυτό αντιστοιχεί σε χαρακτηριστικούς χρόνους

$$5 \cdot 10^{-23} s \leq t_{nuclear} \leq 5 \cdot 10^{-22} s$$

Σε αδρόνια ή πρώτη διεγερμένη κατάσταση, αυτή του συντονισμού Δ βρίσκει στα ($E = 300 MeV$) αντιστοιχεί σε χαρακτηριστικό αδρονικό χρόνο $t_{hadronic} = 2.2 \cdot 10^{-22} s$, που αξίζει να παρατηρήσουμε ότι είναι μόλις ένα παράγοντα 2 μικρότερος από τον αντίστοιχο t_{causal} .

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι οι πυρηνικές κλίμακες είναι εξαιρετικές και εντυπωσιακές. Οι εμπειρίες μας και οι διαισθήσεις μας δεν βοηθούν. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται χρήση κβαντικής φυσικής όχι όμως και σχετικότητας.

Μονάδες

Ήδη έγινε προφανές ότι ορισμένες μονάδες και συνδυασμοί μονάδων έχουν ιδιαίτερη χρησιμότητα στους υπολογισμούς μας, όπως:

m_p	$=$	$938 MeV/c^2$	Μάζα πρωτονίου
m_π	$=$	$140 MeV/c^2$	Μάζα πιονίου
m_e	$=$	$0.511 MeV/c^2$	Μάζα ηλεκτρονίου
c	$=$	$3 \cdot 10^{23} fm/s^2$	ταχύτητα φωτός στο κενό

Οι ακόλουθοι συνδυασμοί μονάδων είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στην επίλυση προβλημάτων:

$$\hbar c = 197.327 MeV fm$$

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

Διαδίκτυο

Εισαγωγικές διαλέξεις απο το μάθημα "Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική και Στοιχειώση Σωματί-
α" (Τμήμα Παπανικόλα - Γιόκαρη - Στυλιάρη) στην διεύθυνση:
<http://www.iasa.gr/nucl>

Περισσότερες πληροφορίες για το τι πραγματεύεται η σύγχρονη πυρηνική επιστήμη μπορείτε να
βρείτε στο διαδίκτυο και στις ακόλουθες διευθύνσεις:

American Chemical Society, Division of Nuclear Chemistry and Technology
<http://www.cofc.edu/nuclear/>

American Physical Society, Division of Nuclear Physics <http://nuclth.physics.wisc.edu/dnp/>

Argonne National Laboratory, Physics Division <http://www.phy.anl.gov/>

Bates Linear Accelerator Center, Massachusetts Institute of Technology
<http://mitbates.mit.edu/index2.stm>

Brookhaven National Laboratory <http://www.bnl.gov/bnlweb/departments.html>

E. O. Lawrence Berkeley National Laboratory <http://www.lbl.gov/>

Indiana University Cyclotron Facility <http://www.iucf.indiana.edu/>

Institute for Nuclear Theory, University of Washington <http://int.phys.washington.edu/>

Los Alamos National Laboratory <http://www.lanl.gov/worldview/>

National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University
<http://www.nscl.msu.edu/>

Oak Ridge National Laboratory, Physics Division <http://www.ornl.gov/>

Thomas Jefferson National Accelerator Facility <http://www.jlab.org/>

Ασκήσεις

- 1.1 Να εξηγήσετε το γεγονός ότι α) ο χάρτης νουκλιδίων περιλαμβάνει μόνο περι τα 5700 δέσμια νουκλίδια και β) ότι λιγότερα απο 300 απο αυτά είναι σταθερά.;
- 1.2 Μετρήσεις ακριβείας έδειξαν ότι η ακτίνα του νουκλεονίου είναι 0.7fm ενώ αυτή του ^{208}Pb είναι 6.71fm . Με αφετηρία τις μετρήσεις αυτές να βρείτε τον λόγο της μέσης απόστασης νουκλεονίου - νουκλεονίου ως προς τη διάμετρο τους;
- 1.1 Να εκτιμήσετε τα χαρακτηριστικά μήκη, μάζες, ενέργειες και χρόνους για Α) Ατομικά Β) Πλανητικά και Γ) Γαλαξιακά συστήματα
- 1.3 Σύμφωνα με το πρότυπο των σωλήνων ροής ("flux tube model") η δύναμη που χαρακτηρίζει την αλληλεπίδραση κουάρκ - κουάρκ σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να προσεγγιστεί απο το τύπο $F = -kr$. Ο σωλήνας αυτός κόβεται στα δύο όταν αρκετή ενέργεια συσσωρευτεί ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί ένα πιόνιο ($q\bar{q}$). Με βάση το πρότυπο αυτό, ποιά θα πρέπει να είναι η ακτίνα των αδρονίων σε όρους k .

Αναφορές

- [1] W.N. Cottingham & D. A. Greenwood "Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική" Έκδόσεις Τυπωθήτω, Αθήνα Ελλάδα(1996)
- [2] R. Badhuri " Models of the Nucleon" (Addison Wesley, 1988)
- [3] S. S. M. Wong "introductory Nuclear Physics", Prentice Hall (1990)
- [4] H. Frauenfelder and E.M. Henley, "Subatomic Physics", Prantice - Hall (1991)
- [5] J.M. Eisenberg and W. Greiner, "Microscopic Theory of the Nucleus" Vol III, North Holland (1976)
- [6] W. Greiner and J. A. Martins, "Nuclear Models" , Springer Verlag (1996) K. Heyde "the Nuclear Shell Model" Springer Verlag (1994)
- [7] A. Sitenko and V.Tartakovskii, "Lectures on the Theory of the Nucleus" Pergamon (1975)
- [8] J.D. Walecka, "Theoretical Nuclear and Subnuclear Physics", Oxford University Press (1995)
- [9] A. Bohr and B.R. Mottelson, "Nuclear Structure" Vols I,II & III, W.A. Benjamin (1969 - 1975)
- [10] DeShalit and Feshbach "Nuclear Physics" vols 1 & 2 (John Wiley, 1974)
- [11] Ring and Schunk " The Nuclear Many Body Problem" (Springer Verlag,1980)