

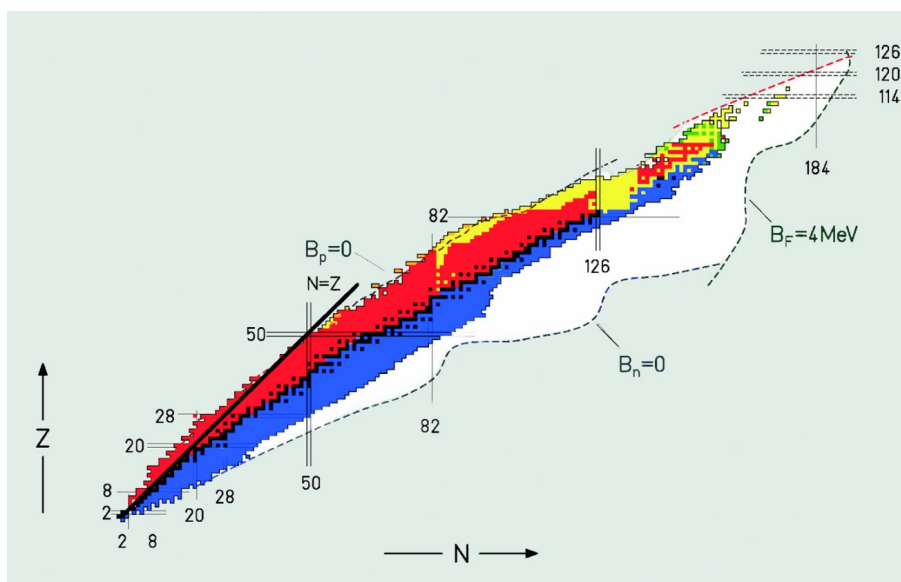
Διάλεξη 2: Πυρηνική Σταθερότητα, σπιν & μαγνητική ροπή

Πυρηνική Σταθερότητα

Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια τα οποία βρίσκονται συγκεντρωμένα σε έναν πάρα πολύ μικρό χώρο. Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι θα πρέπει να υπάρχει μια επιπλέον ελκτική δύναμη η οποία μάλιστα αντισταθμίζει αλλά και υπερτερεί της άπωσης Coulomb μεταξύ των ομώνυμα θετικά φορτισμένων πρωτονίων. Η δύναμη αυτή είναι η **ισχυρή αλληλεπίδραση** η οποία είναι η ισχυρότερη αλληλεπίδραση στη φύση. Η ισχυρή αλληλεπίδραση όμως δεν γίνεται αντιληπτή στην καθημερινή μας ζωή λόγω της **πολύ μικρής εμβέλειας** ($\sim fm$).

Διάφοροι συνδυασμοί νετρονίων και πρωτονίων δημιουργούν μια τεράστια ποικιλία πυρήνων. Προφανώς ορισμένοι από αυτούς είναι περισσότερο ή λιγότερο σταθεροί ή κάποιοι δεν υπάρχουν καθόλου λόγω της μη ύπαρξης δέσμιων καταστάσεων.

Ένας πολύ όμορφος και χρήσιμος τρόπος παρουσίασης των πυρηνικών συστημάτων είναι ο **πίνακας των νουκλιδίων**. Πρόκειται στην ουσία για ένα σύστημα συντεταγμένων όπου ο άξονας των x αντιστοιχεί στον αριθμό των νετρονίων και ο άξονας των y στον αριθμό των πρωτονίων. Το κάθε ζεύγος λοιπόν "συντεταγμένων" αντιστοιχεί σε ένα πυρηνικό σύστημα. Στη πιο συνηθισμένη απεικόνιση του πίνακα των νουκλιδίων, με χρώμα μαύρο παρουσιάζονται οι σταθεροί πυρήνες, ενώ τα διαφορετικά χρώματα είναι χαρακτηριστικά των τρόπων αποδιέγερσης των πυρήνων. Πυρήνες που δεν υπάρχουν ή δεν έχουν (βάσει υπολογισμών) καθόλου δέσμιες καταστάσεις δεν παρουσιάζονται καθόλου.



Σχήμα 1: Ο πίνακας των νουκλιδίων

Σήμερα πλέον γνωρίζουμε ότι υπάρχουν **198 σταθερά ισότοπα** με χρόνο ζωής τον ίδιο ή μεγαλύτερο από αυτόν του σύμπαντος ενώ στον πλανήτη μας και γενικότερα στην περιοχή του ηλιακού μας συστήματος υπάρχουν 86 φυσικά ραδιοϊσότοπα με χρόνο ζωής

συγκρίσιμο με αυτό του ηλιακού μας συστήματος. Σήμερα **επιπλέον των φυσικών ισοτόπων γνωρίζουμε** με διάφορους τρόπους **την ύπαρξη 3600 ισοτόπων** τα οποία έχουν παρατηρηθεί για τουλάχιστον μια φορά. Βάσει υπολογισμών αλλά και βάσιμων πειραματικών ενδείξεων επίσης γνωρίζουμε ότι **υπάρχουν συνολικά τουλάχιστον 6000 διαφορετικά πυρηνικά συστήματα**. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει τεράστιος όγκος πληροφορίας που απομένει να διερευνηθεί. Δηλαδή θα έλεγε κανείς ότι η έρευνα στην πυρηνική φυσική ακόμα βρίσκεται (δυστυχώς ή ευτυχώς !) σε ένα αρχικό στάδιο όπου πολύ δουλειά πρέπει να γίνει ακόμη ώστε να θεωρήσουμε ότι κατανοούμε και προβλέπουμε πλήρως τις πυρηνικές ιδιότητες.

Από την αναπαράσταση και μόνο των διάφορων πυρηνικών συστημάτων στον πίνακα των νουκλιδίων μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

Σε μικρές σχετικά πυρηνικές μάζες η κοιλάδα σταθερότητας βρίσκεται ακριβώς πάνω στην διαγώνιο N=Z. Σε βαρύτερα πυρηνικά συστήματα ο αριθμός των νετρονίων γίνεται μεγαλύτερος από αυτόν των πρωτονίων. Αυτό συμβαίνει προκειμένου η ελκτική ισχυρή αλληλεπίδραση -μέσω των επιπλέον νετρονίων- να αντισταθμίσει την άπωση Coulomb η οποία γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη καθώς αυξάνει το Z. Επιπλέον από τον πίνακα των νουκλιδίων μπορεί αμέσως να παρατηρηθεί ότι για μεγάλες πυρηνικές μάζες δεν υπάρχουν σταθερά πυρηνικά συστήματα. Αυτό συμβαίνει διότι έχει αυξηθεί τόσο πολύ η άπωση λόγω της H/M αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρωτονίων, όπου μαζί με την αύξηση των διαστάσεων του πυρήνα και λόγω της μικρής εμβέλειας της ισχυρής αλληλεπίδρασης δεν μπορεί πλέον να δημιουργηθεί ένα σταθερό πυρηνικό σύστημα. Έτσι, **το βαρύτερο φυσικό ισότοπο** που υπήρχε στον πλανήτη μας τουλάχιστον πριν την πρώτη πυρηνική δοκιμή ή πριν δημιουργηθούν τα πρώτα πυρηνικά απόβλητα ήταν το ^{238}U .

Από διάφορες παρατηρήσεις, αλλά και από μια προσεκτική ματιά στις ιδιότητες των πυρηνικών συστημάτων παρατηρούμε ότι υπάρχουν μαγικοί αριθμοί με αυξημένη σταθερότητα (όπως και στα άτομα). Με άλλα λόγια για συγκεκριμένο αριθμό νουκλεονίων σχηματίζονται "περισσότερο" δέσμιες καταστάσεις από ότι γειτονικοί πυρήνες. Αυτοί οι **μαγικοί αριθμοί είναι: N=2, 8, 20, 28, 56, 82, 126**

Επιπλέον σε διάφορες περιοχές του πίνακα των νουκλιδίων μπορούμε να παρατηρούμε αυξημένη σταθερότητα για εκείνους του πυρήνες όπου Z άρτιο και N άρτιο ή απλώς $A=N+Z$ άρτιο.

Πυρηνικό σπιν και μαγνητική ροπή

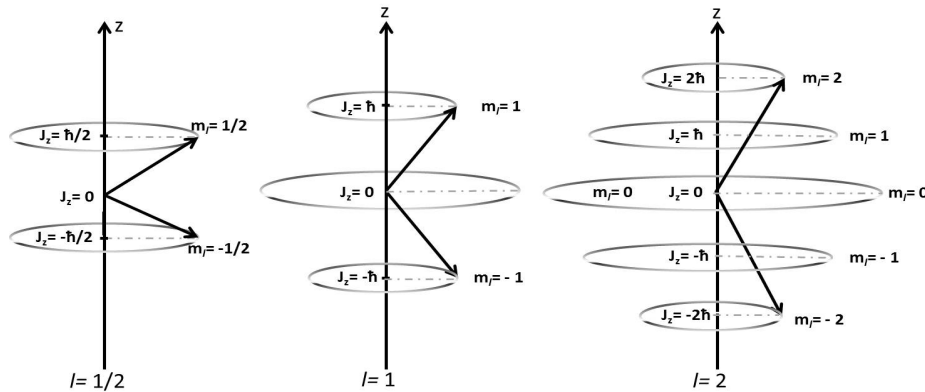
Μια ακόμη ιδιότητα των πυρήνων που πρέπει να αναφερθεί είναι αυτή του πυρηνικού spin. Πρόκειται για την εσωτερική στροφορμή που παρουσιάζει ο πυρήνας η οποία φυσικά και είναι κβαντισμένη (όπως και οτιδήποτε στον μικρόκοσμο) με μέτρο

$$|J| = \sqrt{J(J+1)} \hbar$$

και προβολή στον άξονα των Z:

$$J_z = -J\hbar, -(J-1)\hbar, \dots, (J-1)\hbar, J\hbar$$

Ο αριθμός J που χαρακτηρίζει το μέτρο της στροφορμής μπορεί να είναι ακέραιος ή ημιακέραιος. Δηλαδή $J=0,1,2,1/2,3/2$ κτλ ανάλογα με τον πυρήνα αλλά και την ενεργειακή του στάθμη.



Σχημα 2: Η προβολή της στροφορμής του πυρήνα στον άξονα των Z για διαφορετικές περιπτώσεις του J .

Με την πυρηνική στροφορμή σχετίζεται και η μαγνητική ροπή που παρουσιάζουν όλοι οι πυρήνες με $J \neq 0$. Για την μέτρηση της μαγνητικής ροπής χρησιμοποιείται ως μονάδα η πυρηνική μαγνητόνη σε αναλογία με την ατομική μαγνητόνη του Bohr που αντιστοιχεί στην μαγνητική ροπή του του σπιν ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου. Η πυρηνική μαγνητόνη ορίζεται ως εξής:

$$\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

και είναι κατά πολύ μικρότερη από την μαγνητόνη του Bohr μ_B λόγω της διαφοράς μάζας μεταξύ ηλεκτρονίου και πρωτονίου.

Η μαγνητική ροπή ενός ελεύθερου πρωτονίου και ενός νετρονίου μετρήθηκαν και βρέθηκαν διαφορετικές από αυτές που αναμένονταν με την θεώρηση ότι τόσο το πρωτόνιο όσο και το νετρόνιο είναι στοιχειώδη σωματίδια. Μάλιστα το νετρόνιο βρέθηκε να έχει αρνητική μαγνητική ροπή αν και ηλεκτρικά ουδέτερο σωματίδιο. Αυτή είναι και μια **πρώτη ένδειξη του γεγονότος ότι τόσο το πρωτόνιο όσο και το νετρόνιο τελικώς δεν είναι στοιχειώδη σωματίδια αλλά αποτελούνται από κουάρκς.** Αργότερα με βάση την σύσταση των νουκλεονίων από κουάρκς εξηγήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια η παρατηρούμενες μαγνητικές ροπές των βαρυονίων εν γένει. Πιο συγκεκριμένα:

Η μαγνητική ροπή του πρωτονίου βρέθηκε να είναι παράλληλη προς την ιδιοστροφορμή του (σπιν) και ίση με:

$$|\mu_{sz}|_{proton} = 2.7928 \mu_n$$

Ενώ για το ουδέτερο νετρόνιο αν και δεν έχει φορτίο βρέθηκε να έχει μαγνητική ροπή αντίρροπη αυτής της ιδιοστροφορμής του (συμπεριφορά αρνητικού φορτίου ενώ είναι ηλεκτρικά ουδέτερο!)

$$|\mu_{sz}|_{neutron} = 1.9130 \mu_n$$

Εφόσον ο πυρήνας παρουσιάζει μαγνητική ροπή είναι φυσικό όταν αυτός βρίσκεται εντός ενός μαγνητικού πεδίου να του ασκείται μια μαγνητική ροπή:

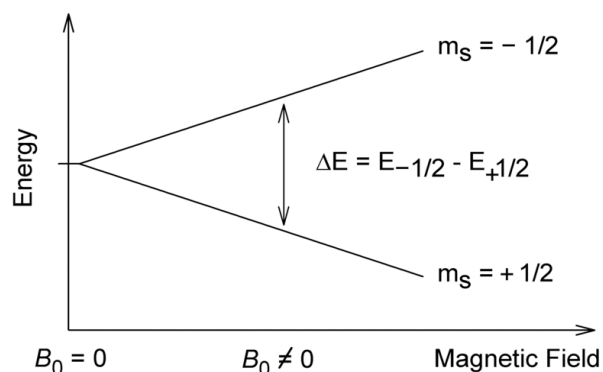
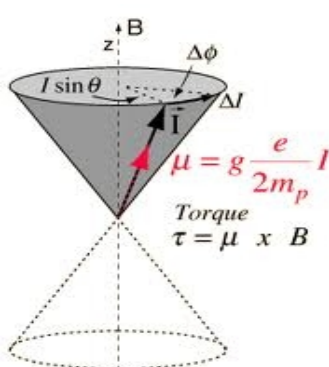
$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

ή αντίστοιχα η δυναμική ενέργεια μιας μαγνητικής ροπής είναι:

$$u = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

Δύο φαινόμενα που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σχετίζονται με την μαγνητική ροπή του πυρήνα είναι η μετάπτωση Larmor και ο διαχωρισμός των ενεργειακών σταθμών εντός μαγνητικού πεδίου για πυρηνικές καταστάσεις μη μηδενικού σπιν. Η μετάπτωση Larmor αφορά στην χαρακτηριστική κυκλική μεταπτωτική κίνηση του διανύσματος της μαγνητικής ροπής όταν ο πυρήνας βρεθεί εντός ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} . Η συχνότητα της μεταπτωτικής αυτής κίνησης είναι:

$$\omega_L = \frac{\mu B}{I \hbar} \quad \text{όπου } I = J \text{ (πυρηνικό σπιν} = \text{κβαντικός αριθμός στροφορμής)}$$



Σχημα 3: Η κυκλική μεταπτωτική κίνηση του διανύσματος της μαγνητικής ροπής όταν ο πυρήνας βρεθεί εντός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου B . Δεξιά παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των ενεργειακών σταθμών για πυρήνα με σπιν $1/2$ εντός μαγνητικού πεδίου.

Ως προς την ενέργεια ενός πυρήνα με σπιν $= 1/2$ εντός ενός μαγνητικού πεδίου υπάρχουν δύο διακριτές ενεργειακές στάθμες

$$u_1 = -\mu \cdot B \quad u_2 = \mu \cdot B \quad \text{με διαφορά} \quad \Delta u = 2\mu \cdot B$$

Είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε τις μεταβάσεις αυτές μέσω μια τεχνικής που ονομάζεται πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός. Εδώ έχουμε ένα ισχυρό σταθερό μαγνητικό πεδίο μαζί με ένα ασθενέστερο πεδίο RF όπου παρέχει την ενέργεια ώστε να έχουμε μεταβάσεις μεταξύ των δυο αυτών καταστάσεων (παράλληλη και αντιπαράλληλη μαγνητική ροπή). Καταγράφοντας τις μεταπτώσεις αυτές μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την σύσταση, την δομή αλλά και γενικότερα την εσωτερική δομή του δείγματος. Η τεχνική αυτή σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στην έρευνα όσο και στην ιατρική (MRI – Magnetic Resonance Imaging). Μάλιστα στις εφαρμογές της ιατρικής πιο συχνά επιλέγονται εκείνες οι συχνότητες συντονισμού που αντιστοιχούν στο ^1H (άλλοτε ^{13}C , ^{17}O) ώστε να παρατηρούνται οι αντίστοιχες μεταπτώσεις μεταξύ των δύο πιθανών καταστάσεων. Τομογραφία επιτυγχάνεται αλλάζοντας την συχνότητα του RF πεδίου ανάλογα με το πως αλλάζει το σταθερό πεδίο B κατά μήκος του δείγματος.

Παράδειγμα:

Υπολογισμός συχνότητας Larmor για ^1H και $B=1\text{T}$ ($\mu_n=5.0508 \cdot 10^{-27} \text{ J/T} = 3.1524 \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}$)

$$\omega_L = \frac{\mu B}{I \hbar} = \frac{2.7928 \cdot 5.051 \cdot 10^{-27} \text{ J/T} \cdot 1 \text{ T}}{(1/2) \cdot 1.0546 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}$$

$$\omega_L = \frac{\mu B}{I \hbar} = 267 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \Rightarrow f = \frac{267 \cdot 10^6}{2\pi} = 42.5 \text{ MHz}$$